

ספר : **זואופיסיקה ופלנטופיסיקה**  
**( הפיסיקה של בעלי החיים והצמחים )**

תוכן עניינים

הקדמה

פרק א) עקרונות הגישה הפיסיקלית

- א.1) סדר הנושאים לחקירת החי והצומח
- א.2) הצבעים בטבע
- א.3) התפקודים הפיסיקליים של הצבעים בצומח ובחי
- א.4) שיטת תשע האזורים

פרק ב) סודם הפיסיקלי של צבעי הפרחים

- ב.1) תפקודי הפרחים על סמך מעקב אישי
- ב.2) שיטות בידוד חם וקור בפרחים
- ב.3) עקרונות אופטיים באנטנות ומנחי גלים ושימושם בפרחים
- ב.4) תוצאות מחקרים מדעיים
- ב.5) סיכום לפרק הפרחים
- ב.6) דף עבודה לחקירת צבעי פרחים

פרק ג) סודם הפיסיקלי של הצבעים בבעלי חיים

- ג.1) "העין" בזנב הטווס
- ג.2) עופות
- ג.3) חרקים
- ג.4) יונקים
- ג.5) דגים
- ג.6) יונקים בים
- ג.7) סיכום לפרק בעלי החיים
- ג.8) דף עבודה לחקירת צבעי בעלי חיים

ד) סיכום

ה) טבלאות

ו) ביבליוגרפיה

הקדמה

בספר זה מוצגת גישה חדשה, "גישה פיסיקלית" להבנת תפקידי הצבעים בחי ובצומח. הגישה הפיסיקלית מפגישה את המאקרו-ביולוגיה עם חוקי הפיסיקה ועם עקרונות טכנולוגיים מגוונים. על פי הגישה הפיסיקלית, כל הצורות והצבעים בבעלי חיים ובצמחים הם ביטוי לתכונות פיסיקליות של החלקים השונים ולתפקודיהם. הטענה המרכזית של הגישה הפיסיקלית החדשה היא שמטרתם הראשונית של החלקים הצבועים היא לאפשר לבעלי החיים ולצמחים להשיג את מגוון מזונותיהם. במינוח "מזונות" אני אני כולל גם את הקרינות השונות ותנאי הסביבה האחרים הדרושים לקיום והתפתחות החי או הצומח המסוימים. על פי הגישה הפיסיקלית, בעלי החיים והצמחים עשויים להסתייע בצורותיהם ובצבעיהם גם לצרכים משניים, כגון הגנה, הסוואה, אזהרה, חיזור, עזרה בהפריה, פרסומת וכו', הנקראים כאן באופן כללי בשם "הגישה חברתית". לשם דוגמא, היד שלנו נועדה, כתפקוד ראשוני, לקרב את המזון אל הפה. ללא תפקוד חשוב זה היה על האדם לקרב את הפה אל המזון בדרכים אחרות, כפי שעושים בעלי חיים אחרים כגון, הולכי ארבע, ציפורים, דגים ועוד. כתפקידים משניים של היד ניתן לציין זריקת אבן לצורך ציד, הגנה, כתיבה, הפעלת מחשב ועוד. ספר זה מיועד לחובבי הטבע, לחוקרים, למהנדסים ולתלמידי ביולוגיה ופיסיקה במוסדות האקדמיים ובבתי הספר. גם חקלאים, וטרינרים ואנשי רפואה אחרים עשויים למצוא עניין בנושא רב תחומי זה.

אל הנושא הגעתי בדרך מקרה כאשר ביום שמש של חורף 1984 קפצתי לביקור בגבעת האיריסים ליד העיר נס ציונה בישראל. מתוך סקרנות טבעית, הצצתי אל תוכו של פרח **איריס הארגמן** ונדהמתי לגלות דמיון רב בין מבנהו של פרח זה ובין אחד ממוליכי הגלים בתקשורת לוויינים בהם עסקתי באותה עת. התבוננתי בפרחים מסוגים אחרים סביבי ונוכחתי כי גם בהם ניתן למצוא דמיון לאנטנות ולמוליכי גלים שונים. למשל פרחי הצלחת האדומים והצהובים דומים לאנטנות צלחת לקליטה מלוויינים המצויות בגדלים שונים בתחנת הלוויינים של בזק בעמק האלה. כיום ניתן לראות אנטנות צלחת קטנות גם על גגות של בתים רבים. דמיון זה רמז לי על האפשרות כי פרחי הצלחת מגבירים את קרני השמש לכיוון האבקנים והשחלות כדי לזרז את התפתחותם. מאז אותו יום חיפשתי אחר הסברים פיסיקליים נוספים למבנה ולצבעים של כל סוגי הפרחים. ב-1985- כתבתי טיוטה ראשונה בנושא בשם "סודם של הפרחים", קיבלתי הערות ראשונות, הנחתי את הטיוטה במגרה והמשכתי בעיסוקי בנושאי חלל ותקשורת לוויינים. יותר מאוחר נתתי חוגים לנוער שוחר מדע וילדים מחוננים במוסדות אקדמיים ובתי ספר בנושאי פיסיקה וטכנולוגיה. באחד הימים, ביקש ממני מנהל בית ספר מסוים לצרף לחוג הפיסיקה שלי תלמידים מחוננים שאהבו ביולוגיה ורצו לשמוע אך רק על בעלי חיים. נעניתי לאתגר והתחלתי בחיפוש הסברים פיסיקליים למבנה ולצבעים של בעלי חיים. הרחבתי את החוגים בנושא "הפיסיקה של בעלי החיים והצמחים" גם למקומות האחרים ובחנתי יחד עם תלמידי דוגמאות רבות של בעלי חיים וצמחים, כאשר נקודת המוצא היא סל המזונות (תפריט) של בעל החיים והמכשולים עליהם הוא צריך להתגבר כדי להשיג מזונותיו. בהדרגה התגבשה אצלי ההכרה כי **לגישה הפיסיקלית** הזאת יש **חשיבות ראשונית** בהבנת הצורה והצבעים בחי ובצומח, בעוד הסיבות, על פי מה שכנחתי כאן, "**הגישה החברתית**" המקובלת - כגון הגנה, הסוואה, אזהרה, חיזור, עזרה בהפריה, פרסומת וכו', - הן תוצאות **משניות** בלבד. חלק מההסברים מובאים בספר זה שנועדה להציג את העקרונות של "הגישה הפיסיקלית" ודרכי התגבשותה על סמך בדיקות **תצפיתיות** ראשוניות שביצעתי. ב-1992- העליתי במסמך את הבסיס ל"גישה הפיסיקלית" והצגתי אותו בפני מספר אנשי מחקר בכירים בביולוגיה. מההדים שקיבלתי היה ברור כי הנושא מעניין וחשוב ויש לחפש עבורו תקציבי מחקר ופרסום. בינתיים היה עלי לטפל בנושאים אחרים בתחום החלל והנושא הוכנס למגרה. ב-1998- ניסתה "החברה להגנת הטבע" בישראל לעזור בהבאת הנושא החשוב בפני הציבור והוחלט לצאת תחילה עם חוברת צנועה. אך לא נמצא תקציב לכך והחלטתי להרחיב את החוברת לרמה של הספר הנוכחי. תודותי מעומק לב לחברה להגנת הטבע. במהלך הכנת החוברת ב-1998- בדקתי באמצעות המחשב האם נעשו מחקרים מדעיים העשויים לתמוך בגישה הפיסיקלית שלי. לשמחתי התברר כי בשנים האחרונות נעשו ע"י חוקרים רבים מדידות מעמיקות על פרחי הקוטב והאלפים, אשר מהן הסתבר כי סוגים שונים של פרחי צלחת אכן משמשים כמגבירי אנרגיית שמש עבור האבקנים והשחלות. אחד המחקרים אפילו הצביע על כך כי חימום כזה לא יכול להיות למען משיכת החרקים, אלא יש לו תפקיד חשוב בקידום התפתחות האבקנים, הצוף והביציות בשחלות של הפרחים שנבדקו. בספר אדון על כמה מתוצאות המחקרים. מחקרים כאלה נותנים חיזוק רב לגישה הפיסיקלית, לפחות בכל הנוגע להגברת אנרגיה בפרחים שנחקרו. כדי לאשר את "**הגישה הפיסיקלית**" כולה באופן מדעי מלא יש לערוך עוד מחקרים מדעיים רבים. בינתיים, יש להביא לתשומת לב חובבי הטבע והחוקרים במקצועות השונים על האפשרויות הרבות הגלומות בגישה הפיסיקלית החדשה להבנת החי והצומח. בספר אני מביא הסברים תאורטיים לגישה החדשה עם דוגמאות מבעלי חיים ופרחים. השתדלתי להביא את הדברים בפשטות ובצורה כזאת שגם מי ששכח, או לא למד, פיסיקה והנדסות טכנולוגיות יוכל להבין ולהנות מהרעיונות שבחוברת. יובאו גם דפי עבודה למתעניינים. לבסוף, ברצוני להעיר כי רשימת הביבליוגרפיה רחוקה מלהיות שלמה. השתדלתי לתת מקורות שקל לציבור הרחב בישראל להשיגם. יש עוד הרבה מקורות מצויינים בעברית ולועזית שלא נכללו כאן מקוצר היריעה. הקוראים ימצאו לבטח מקורות נוספים אלו ואחרים בביתם ובספריות ציבוריות ואקדמיות.

## פרק א. עקרונות הגישה הפיסיקלית

### 1.א. סדר הנושאים לחקירת החי והצומח.

במהלך שנות חקירתי האישית את הקשרים בין החוקים הפיסיקליים לבין המבנים והצבעים של בעלי חיים, הגעתי למסקנה כי יהיה נכון לחקור את החי והצומח על פי סדר הנושאים הבא.

1) **נקודת המוצא להבנת בעל חי או צומח הוא סל המזונות שלו** (תפריטו). לכל אחד סל המזונות המיוחדים לו המצויים בסביבות מיוחדות ובתפוזרות מסוימות. סל המזונות עשוי לכלול גם את סוגי הקרינות השונות.

2) בעל החיים צריך לנוע בד"כ כדי להשיג את מזונותיו. אצל הצמח - המזונות נעים בד"כ לעברו. גם בעל החיים וגם הצמח צריכים לפתח שיטות כדי להתגבר על מכשולים סביבתיים שונים בדרכים להשגת מזונותיהם. מכשולים אלו עשויים להיות מכשולים טופוגרפיים, מכשולי תכסית, מכשולי תווד (מים, אויר, קרקע וכו'), מכשולי תאורה (יום, לילה, יער, מערות וכו'), מכשולי מזג אויר (חום, קור, לחות, יובש, רוחות, גשמים, שלגים וכו') ומכשולים נוספים.

3) כדי להתגבר על המכשולים הרבים צריכים החלקים השונים בבעל החיים או בצמח להיות בנויים על פי חוקים פיסיקליים/ הנדסיים מתאימים.

4) לשם כך עליהם להיות מורכבים ממבנים מיוחדים ומחומרים מיוחדים כדי שיעמדו בדרישות הפיסיקליות כגון משקל, חוזק, גמישות, לחץ, טמפרטורה, לחות, חדירות וכו'.

5) למבנים וחומרים מיוחדים המצויים בטבע יש צבעים מיוחדים. הדבר נכון לא רק בטבע. גם במהלך בניית בית, בשלב שלפני הטיח והצביעה המלאכותיים, ניתן להבחין בצבעים המגוונים בהתאם למבנים ולחומרים השונים מהם מורכב הבית. כל צבע של חלק בבניין מרמז על התפקוד של אותו חלק. למשל, הצבע האפור מרמז על בטון, כלומר קשיחות רבה. הצבע החום מרמז על קורת עץ, כלומר על קשיחות קטנה יותר ויכולת החדרת מסמרי עץ. הטענה המרכזית שלי היא: **בטבע אין צביעה מלאכותית**. תוספת צבע לחלק מסוים לשם יופי או משיכת חרקים, כפי שסבורה "הגישה החברתית", עשויה לפגום בתפקוד העיקרי של אותו חלק, מה גם שהיא יקרה מבחינתו של בעל החי או הצמח. אציין כאן כי כאשר מדברים על צבעים בטבע יש להבחין בין צבעי חומרים (פיגמנטים) לבין צבעי מבנה (צבעים ספקטרוניים). צבעי חומרים מתקבלים מבליעת צבעים מסוימים, כאשר נופל עליהם אור לבן, ומוחזר צבע מסוים, עם או בלי הגברה כימית. צבעי מבנה נוצרים כתוצאה מקיום תופעות התאבכות, עקיפה ופיזור של קרני אור בין שכבות מבנה סדורות, כמו למשל בגבישים. כך מתקבל צבע מסוים, התלוי בזווית הפגיעה והיציאה של האור ובמבנה הגאומטרי של השכבות והמרווחים ביניהם. הצבעים של יהלום הם דוגמה טובה לתופעה זאת. יש גם צבעים המתקבלים משילוב של פיגמנטים ומבנה. למעשה, צבעי הפיגמנטים אף הם תולדה של מבנים גבישיים במכלים המכילים את החומר. למשל מכלי מלנין. באופן כללי, ככל שהמרווח בין השכבות מקבילות קטן יותר כך אורך הגל קצר יותר ומקבלים צבע קרוב יותר לקצה הסגול של הספקטרום. לכן, יש קשר עקיף בין חוזק מבנים בטבע לבין צבעיהם אך יש לקחת בחשבון תופעות נוספות.

6) לכן, לדעתי, לא מפתיע שצבע מסוים של חלק כלשהו בבעל החיים או בצמח מעיד על תפקוד מיוחד של אותו חלק.

7) הגיוני להניח שסך כל הצבעים של בעל החיים או הצמח יקבע גם את מידת שרידותו על רקע הסביבה ובהתחשב בהמצאות בעלי חיים אחרים באותה סביבה. אך נראה לי כי שרידות זו היא תוצאה משנית של קיום הצבעים ולא דוקא הסיבה לשמה נוצרו הצבעים בגוף. הגיוני להניח כי בעלי החיים וצמחים המצויים כיום בטבע הם אלו שלא נכחדו בזכות (או למרות) צורתם, צבעיהם וכישוריהם. יש להניח גם כי בעל החיים יודע לנצל את מראהו החיצוני כדי להינצל מאויביו ולהשיג מזונו, אך זה שימוש משני בתכונות קיימות. אצלנו, למשל, התפקיד הראשוני של היד הוא לקרב את המזון לפה. ללא תפקוד חשוב זה היה על האדם לקרב את הפה אל המזון בדרכים אחרות, כפי שעושים בעלי חיים אחרים כגון, הולכי ארבע, ציפורים, דגים ועוד. כתפקידים משניים של היד ניתן לציין זריקת אבן לצורך ציד, הגנה, כתיבה, הפעלת מחשב ועוד. קיימת גם האפשרות המעניינת של שימוש בצורות ובצבעים בחי ובצומח אפילו לצורך פרסומת, כפי שהראה זהבי בסדרת מאמריו (ראו למשל ב-[[35]].

8) נימוק חשוב התומך ברעיון החדש שלי הוא העובדה כי בבעלי חיים רבים הזכר והנקבה שונים בד"כ בצורה ו/או בצבעים. לדעתי, זאת משום שתפקודיהם שונים. גם ההבדלים בצבעים בין צעירים לבוגרים מצביע על תפקודים שונים.

9) נימוק חזק נוסף לרעיוני הנ"ל הוא העובדה המוכרת לכל כי ניתן לקבוע מידת הבשלות של פירות וירקות רבים, דהינו קשיותם, גם על פי השינויים בצבעיהם. למשל, עגבניה ירוקה היא קשה. אך כאשר היא מתרככת צבעה נעשה אדום.

10) לי, כפיסיקאי, ברור שהן הצמחים והן בעלי החיים הם קודם כל **גופים פיסיקליים**, כלומר גופים המציינים לכל חוקי הפיסיקה. לכן עליהם לעמוד בתנאי עומס וסביבה כפי שכל דומם עומד בהם. כדי לראות זאת יש להעמיק את ההבנה בפיסיקה ובהנדסות של טכנולוגיות מתקדמות מגוונות אשר פותחו בעשורים האחרונים.

11) לאור כל זאת, בעת שמנסים לחקור ולהבין את בעלי החיים והצמחים יש לענות על השאלות הבאות פי הסדר הבא:

- (א) מהו סל המזונות ?
- (ב) מהם המכשולים להשגת סל מזונות זה ?
- (ג) מהן השיטות להתגברות על מכשולים אלו ?
- (ד) מהם המבנים והחומרים הדרושים לישום אותן שיטות ?
- (ה) מהן התכונות הפיסיקליות של אותם מבנים וחומרים ?
- (ו) מהם התהליכים הכימיים הדרושים להשגת אותן תכונות פיסיקליות ?
- (ז) מהם התהליכים הביולוגיים הדרושים לביצוע התהליכים הכימיים הללו ?
- (ח) מהם הקשרים עם הסביבה הדרושים כדי להשיג את סל המזונות ולשרוד, תוך שימוש בתכונות הפיסיקליות, הכימיות והביולוגיות הללו ?

## 2.א הצבעים בטבע

כאשר דנים בצבעי הפרחים ובעלי החיים יש חשיבות רבה להבנת העקרונות הבסיסיים של צבעים בטבע. אביא כאן הסבר קצר. המעוניינים בהרחבה מוזמנים לעיין באנציקלופדיות או בספרים על תורת האור, למשל [1]. כידוע, קרני האור הצבעוניים המגיעים לעינינו הם חלק קטן מאד מהספקטרום של הגלים האלקטרומגנטיים (א"מ). כמו בגלי ים, גם לגל הא"מ יש אורך גל המוגדר כמרחק בין שני שיאים סמוכים של הגל. ככל שאורך הגל קצר יותר כן האנרגיה הנמסרת ע"י הגל גבוהה יותר. את הספקטרום הנראה לעינינו ניתן לקבל מקרן אור לבנה של השמש העוברת דרך מנסרה: הצבעים העיקריים שנקבל (צבעי הקשת) הם: סגול, כחול, ירוק, צהוב, כתום ואדום. הסגול הוא האנרגטי ביותר בקבוצה זאת והאדום הוא הפחות אנרגטי בקבוצה. מעל הצבע הסגול קיימים קרניים בלתי נראות לעיני האדם, אולטרה-סגול (א"ס). מתחת לצבע האדום יש סוג נוסף של קרניים בלתי נראות לאדם, אינפרא-אדום (א"א). מעבר לשני אלה יש קרניים א"מ נוספות כפי שרואים **בטבלה 1**, הנותנת גם את תחומי אורכי הגל וגם את אורך הגל המייצג לגבי התחומים שיעסיקו אותנו בחוברת זאת. המעוניינים בהרחבה יכולים לעיין למשל בעמ' E-192 של המדריך המקצועי [10], בעמ' 3 בספר תורת האור של [1], וכן בעמוד הכריכה האחורי של הספר Berkely / Waves [21]. בספר זה ניתן לראות גם את הצבעים של הספקטרום הנראה, בדף הצבעוני שבין עמודים 528 ל-529. לעיתים קרובות קשה להגדיר במדויק את צבעו של פרח או חלק מסוים. במקרים כאלה ניתן להעזר בלוחות צבעוניים, הנותנים גם קודים מספריים או שמות לצבעים. המעוניינים להעמיק בנושא שמות הצבעים והרכביהם יכולים לעיין למשל במילון צבע ישן (באנגלית) [44]. כמו כן ניתן לנצל את התוכנות הנפוצות במחשבים לשימוש בכלי ציור וצביעה. מהם ניתן ללמוד גם את שמות הצבעים הבסיסיים וכיצד להרכיב צבעים חדשים מצבעי בסיס מוגדרים. בנוסף לצבעים שניתנו **בטבלה 1** יש צבעי ספקטרום נוספים המתקבלים מחיבור בכמויות מתאימות של צבעים אחרים. כידוע, ניתן להרכיב את כל צבעי הקשת הנראים לעינינו משלושה צבעים **ספקטרוניים** בלבד: כחול, ירוק ואדום. כפי שרואים ב-[1], הצבע הספקטרוני אדום מרוכז ברובו סביב אורך גל  $6500 \cdot 10^{-10}$  ס"מ; הירוק סביב  $5300 \cdot 10^{-10}$  ס"מ והכחול סביב  $4250 \cdot 10^{-10}$  ס"מ. ערוב של שלושת הצבעים בכמויות שוות נותן צבע לבן. אם לוקחים לבן ומחסרים ממנו את אחד משלושת הצבעים הללו מקבלים את הצבע המשלים, הנקרא גם "צבע חיסור". למשל, אדום+כחול נותן ארגמן (מגנטה) שהוא המשלים של ירוק (רבים מזהים בטעות את הארגמן עם אדום); ירוק+אדום נותן צהוב, שהוא המשלים של כחול; ירוק+כחול נותן תכול, הנקרא גם ציאן (טורקיז), שהוא המשלים של אדום. בדפוס יש שימוש בעיקר בצבעי החיסור הללו: ארגמן, צהוב ותכול. ערוב בכמויות שוות של שניים מהם נותן צבע ספקטרוני יסודי. למשל, ארגמן+צהוב נותן אדום, צהוב+תכול נותן ירוק, ארגמן+תכול נותן כחול. ערוב שלושת צבעי החיסור בכמויות שוות גורם להחסרת כל הצבעים, דהינו מקבלים שחור. אך השחור המתקבל חלש במקצת. לכן מוסיפים בדפוס גם את הצבע השחור. מאחר והניר

עצמו היה לבן, ניתן לאמר כי הצבעים הבסיסיים בדפוס הם שחור, לבן, ארגמן, צהוב ותכול. אנו נציין כאן "צבע" חשוב נוסף והוא "שקוף", דהינו חומר המעביר דרכו באופן טהור את כל הצבעים (כמו מים נקיים). חמשת הצבעים הללו המשמשים בדפוס מצויים לא מעט גם בפיגמנטים בטבע. רצוי לזכור כי בתחילת ימי הדפוס הצבעוני השתמשו בצבעים מהטבע. התפוצה הרבה בטבע של צבעי חיסור נובעת להערכתך מכך שכל חומר בטבע קולט ומנצל צבע ספקטרוני מסויים במידה רבה יותר מאשר את הצבעים הספקטרוניים האחרים. למשל, מולקולת חומר מסוימת עשויה להעדיף את קליטת האדום על פני הכחול והירוק. לכן אותו חומר יראה בעינינו בצבע המשלים ללבן של האדום, דהינו תכול. גם החומרים המשמשים לצרכים הביוכימיים מנצלים אחד או יותר מאורכי הגל של אור השמש ומחזירים את היתר. למשל, כאשר פוגע אור לבן מהשמש בעלה של צמח בולע כלורופיל-A את האדום והכחול ומחזיר את היתר, דהינו ירוק. לכן לעינינו מתקבל עלה בצבע ירוק. חשוב לציין גם את צבעי המבנה המתקבלים כתוצאה מתופעות אופטיות שונות של מבנים מסודרים. למשל צבעי יהלום, שהוא גביש מסודר של אטומי פחמן, משתנים בהתאם לזווית שבה האור פוגע ומוחזר לעינינו. בחי ובצומח רואים גם צבעים המתקבלים משילוב של מבנה ומפיגמנטים. למשל, צבעי נוצות רבות נגרמים משילובים כאלה. בהמשך נראה דוגמאות של צבעים בחי ובצומח ונרחיב שם במקצת את ההסברים הפיסיקליים על צבעים. **בטבלה 2** ניתנים ששת צבעי הבסיס (בשיטת החיסור) וצבעים אחרים המתקבלים בערובים שלהם. רשמנו בטבלה גם ערכים מספריים סמליים בסקלה 0 עד 10 כדי לבטא באופן גס את הגבולות של הצבעים על פי הטווחים המוצגים בטבלה 1. ערכים סמליים אלה ישמשו אותנו בקביעת הערכים הסמליים של התכונות הפיסיקליות המיוחסות לכל אחד מהצבעים, כפי שנראה בהמשך.

כדי לקבל קישורים בין צבעים בסיסיים לבין תכונות פיסיקליות בסיסיות אתיחס בהמשך אל פיגמנטים בסיסיים "אידיאליים" שכל אחד מהם קולט אורך גל ספקטרוני יחיד ומחזיר את כל היתר. יש לכך, בעיני, הצדקות פיסיקליות עמוקות - הקשורות בתכונות מולקולות מסוימות בתוך הפיגמנט שבהן מתבצעת האינטראקציה עם האור - אך כאן לא ארחיב בנושא. שילוב של פיגמנטים "אידיאליים" נותן את הפיגמנטים המוכרים בספרות.

### 3.א. התפקודים הפיסיקליים של הצבעים בצומח ובחי.

כאמור, לאחר עיון במאות דוגמאות מהחי והצומח בטבע מתחזקת דעתי כי הצבעים בחי ובצומח מרמזים על תכונות פיסיקליות מיוחדות של החלקים השונים. השאלה המעניינת ביותר היא האם ניתן למצוא חוקיות אחידה לחי ולצומח, אשר על פיה, בראותנו חלק בעל צבע מסוים, נוכל להסיק על התכונות הפיסיקליות של אותו החלק. אני מניח כי כדי למצוא את כל החוקיות הזאת ידרשו כמה שנות מחקר יסודי. אולם הייתי רוצה להצביע כאן על כמה כיווני מחשבה אשר גובשו אצלי עקב בדיקות ותצפיות ראשוניות. איני מוציא מכלל אפשרות שיתברר במהלך חקירה מעמיקה יותר כי חלק מרעיונותי טעונים תיקונים, אך יש מקום לדעתי להציג אותם כבר עתה - ולו כדי לעורר דיון ומחקר מעמיקים בנושא.

כאמור, ניתן לקבל כל צבע מתערובת מתאימה של צבעים אחרים. על פי אותו העקרון של הרכבת צבעים, חיפשתי תכונות פיסיקליות בסיסיות בטבע אשר שילובן במידות המתאימות יתן את המהות הפיסיקלית של כל חלק בחי ובצומח. כאשר אני מדבר על תכונות פיסיקליות אני מתכוון לתכונות מכניות, חומניות, אופטיות, נוזליות, חדירות ועוד. בספרי הפיסיקה התיכוניים, כגון [1], ניתן למצוא חומר רקע בסיסי בתחומים אלה. לעיתים קרובות תכונות מכניות מסוימות של חלק בחי ובצומח הן הסיבות לתכונות הפיסיקליות האחרות של אותו חלק. בהמשך, גם אם איני מציין זאת במפורש, אני מתכוון בספר זה **לתוספות** של תכונות פיסיקליות. למשל, כאשר מדובר על עור של בעל חי בצבע ירוק שעליו יש כתם צהוב אני מיחס לירוק תוספת נוספת של תכונות פיסיקליות מסוימות לעור כולו בעוד שלצהוב אני מיחס תוספת נוספת של תכונות פיסיקליות לאזור הכתם עצמו. כמו כן אני מתיחס בספר לתכונות פיסיקליות **סגוליות**. למשל, אם הכתם הצהוב הנ"ל מצוי רק על פיסת עור קטנה יש להתיחס לתכונות הפיסיקליות של פיסת העור הזאת ביחס לנפחה ומשקלה. (רצוי להבחין בין הצבע "סגול" לבין "תכונה סגולית". למשל, "משקל סגולי" של גוף מתיחס למשקלו חלקי נפחו).

תכונות **מכניות** נכונות הן הבסיס ליציבות ולתמרון של כל גוף בטבע ובטכנולוגיה. רק לאחר קיום התכונות המכניות יש לשקול את ערך התכונות הפיסיקליות

האחרות. למשל, לא יעזור לנו שהבית שומר על חם בחורף אם הוא מתמוטט. בטבע החי והצומח אני מבחין בתכונות המכניות העיקריות הבאות: אלסטיות למתיחה, עמידות בלחיצה, חוזק לחיתוך (גזירה), גמישות לכיפוף, גמישות לפיתול וקלילות משקלית. למעוניינים בהרחבת הידע על התכונות המכניות של מבנים שונים ניתן לעיין, למשל, בפרק "גמישות" בספר מכניקה של "פיסיקה תיכונית" [1], בספר "תורת החוזק והאלסטיות" [46], באנציקלופדיה העברית ועוד. המונח "גמישות" מתיחס למצב שבו החלק משנה את צורתו עקב הפעלת כח וחוזר למצבו המקורי לאחר הסרת הכח. המונח "חוזק" מתיחס לכך שיש להפעיל כח רב יחסית כדי לשנות את צורת הגוף. המונח "אלסטיות" מתיחס לגמישות ואלסטיות יחד. **בטבלה 3** מובאות הערכות לתכונות המכניות הקשורות לצבעים השונים בחי ובצומח.

בחלקים רבים בבעלי חיים וצמחים ניתן להבחין גם בתכונות **חומניות** שהעיקריות להערכתי הן: בידוד מחום, בידוד מקור, התפשטות בחם, שימור חום, התכווצות בקור ועוד. **בטבלה 4** מובאות הערכות לתכונות החומניות הקשורות לצבעים השונים בחי ובצומח. כמו כן, עבור כל גוף ניתן לבחון את התכונות האופטיות לגבי כל אורך גל: בליעה, החזרה, פיזור, העברה, הסתרה, סינון, קיטוב, הגברה, ועוד. **בטבלה 5** מובאות הערכות לתכונות **האופטיות** הקשורות לצבעים השונים בחי ובצומח. **בטבלה 6** מוצגות הערכות הראשוניות לתכונות **הלחותיות**, דהיינו לתכונות הפיסיקליות הקשורות בלחות, והקשרים המשוערים על ידי ביניהן לבין הצבעים השונים. **בטבלה 7** מובאות הערכות הראשוניות לגבי התכונות הפיסיקליות הקשורות למידת **החדירות** של מולקולות בגדלים השונים דרך החלקים הצבועים בצבעים המסוימים. על החשיבות של תכונות החדירות וקשריהן עם הצבעים עמדתי רק לאחרונה והנושא פחות מגובש אצלי עדיין בהשוואה לתכונות הקודמות. אקווה שבמהלך החקירות בנושא חשוב זה אוכל לאשש או לשנות את הערכותי הראשוניות הללו.

להלן אביא מספר הנמקות כלליות לקישורים שעשיתי בין צבעי הבסיס לתכונות פיסיקליות בסיסיות. מהדוגמאות הרבות של בעלי חיים ופרחים בהמשך הספר ניתן לקבל הנמקות נוספות.

#### (א) שחור.

תכונה **מכנית**: **אלסטיות למתיחה**. כאמור, במינוח אלסטי הכוונה לחוזק פלוס גמישות. למשל, קליפות זרעים רבים של צמחים הן שחורות. כאן חשובה העמידות בפני מתיחת הקליפה בשעה שבתוך הזרע מתרחשים תהליכים הדורשים לחץ פנימי. מקורים של ציפורים דורסות רבות הם שחורים. חשוב שהמקור יהיה חזק ולא ימתח כאשר הדורס קורע את טרפו. אך חשובה למקור אותן ציפורים גם תכונות גמישות לכיפוף ולפיתול. התבוננות **בעיט** הקורע את טרפו יכולה להמחיש דרישות אלו. גם שיערה שחורה יותר אלסטית משערה בהירה. את זאת גילה לי הספר שלי מבלי שידע כי אני מתעניין בנושא.

תכונה **חומנית**: **בידוד מחום**. ניתן לראות תכונה זאת אצל בעלי חיים רבים החשופים לשמש חזקה במשך שעות רבות ביום כגון **העורב השחור** החי במדבריות. כידוע, השחור בולע את קרני האור של השמש. לכן החום נספג בחלק השחור ואינו חודר פנימה לגוף. בעניין זה מוכרת גם התופעה של הנוודים במדבר הלבושים בשכבות ביגוד שחורות.

תכונה **אופטית**: **בליעת כל הקרינות עם אופציה להחזרת קרינה אינפרא אדומה (א"א) ו/או אולטרה סגולה (א"ס)**. כאן מודגשת האפשרות של החזרה בקרינה הבלתי נראית לעיני האדם, אך עשויה בהחלט להראות לעיני החי. למשל נחשים רואים גם קרינת אינפרא אדום, דבורים רואים גם קרינת אולטרה סגול. גוף שחור הנראה בעינינו כמוסווה על רקע שחור עשוי לבלוט מאד בעיניהם של בעלי חיים מסוימים. לכן, מה שנראה "בגישה החברתית" כהסוואה העוזרת לאותו גוף חי שחור לשרוד עשויה להיות על פי הגישה הפיסיקלית, גורם שלילי מבחינת אותו גוף. תכונת **לחות**: **התרחבות בלחות**. דוגמא קלסית היא השערה השחורה במד-לחות המשמשת כמכשיר בעזרתו מודדים את מידת הלחות הסביבתית. תכונה זאת של התרחבות בלחות חשובה גם לזרעים השחורים המתרחבים עם רדת הגשם והצמח מתחיל לצמוח.

תכונת **חדירות**: אי-חדירות למולקולות. גם כאן הזרעים השחורים של צמחים רבים משמשים דוגמא מצוינת. כל חדירה דל חומר לזרע לפני נביטתו עלולה לשבש לחלוטין את מאזן החומרים הפנימיים בו ולהרסו מבפנים.

#### (ב) לבן.

תכונה **מכנית**: עמידות בלחץ. דוגמא מצוינת הן העצמות הלבנות של החוליתניים. תפקידן העיקרי של העצמות הוא לעמוד בפני לחצים ולהעביר אותם לעצמות אחרות של הגוף, ומשם לקרקע או לגופים אחרים בסביבה. גם קונכיות של חלזונות רבים הן לבנות לשם אותם צרכים. למשל, **חלזון בשם לבנונית**. על התכונה המכנית, עמידות בפני לחץ, של תרכובות סידן מבוססים בנינים רבים. גם קליפות ביצים של בעלי חיים רבים הן לבנות בעיקרן, או עם גווניים של לבן. תכונה **חומנית**: **בידוד מקור**. ניתן לראות תכונה זאת למשל בפרווה הלבנה ובנוצות של חיות רבות בארצות הצפון. למשל, **שכוי שלג, בז צפון, דב לבן, חסידה לבנה** ועוד. נשים לב כי הגחון של יונקים רבים הוא לבן. יתכן שיש גם כאן בידוד בפני הקור מהקרקע. לא אחת רואים כלבים וחתולים עם כפות רגליים לבנות. לא מן הנמנע כי גם בכך יש כדי לעזור בבידוד בפני הקור מהקרקע. גם בצמחים רואים לעיתים תוספת של שער לבן באזורים קרים מאד כגון בצמח **אדלוויס** הגדל באלפים השווייצריים. פרחי לילה לא מעטים הם בצבע לבן דווקא. יש לכך חשיבות אופטית מיוחדת כפי שנראה בהמשך, אך גם הבידוד מהקור חשוב בלילות הקרים של המדבריות ואזורי החוף, בהם נפוצים פרחים אלה.

עדיין לא ברור לי לחלוטין כיצד קשור הצבע הלבן דווקא עם הבידוד בפני קור. בתור סברה ראשונית הייתי בודק את הכיוון של שבירת מערבולות הרוח הקרות ע"י שער לבן. יתכן שתכונה כזאת קשורה לתכונה המכנית של לבן, עמידות בפני לחץ, אך מהו המכניזם המדויק עדיין לא ברור לי. כאן נסתפק בעובדות הנראות בטבע שאין להתעלם מהן, בקשר לבידוד הקור ע"י שער לבן.

תכונה **אופטית**: **החזרת כל הקרינות עם אפשרות של בליעת קרינות א"א ו/או א"ס**. הצבע הלבן מחזיר את כל הצבעים ובכך הוא מונע מהחלק הצבוע בלבן להתחמם ע"י קרני השמש שאינן נקלטות בתוך החומר. ידוע למשל שנהוג לצבוע בקיץ גג של בית בסייד לבן כדי שהתקרה הפנימית של הבית לא תהיה חמה.

#### (ג) ארגמן.

תכונה **מכנית**: **גמישות לכיפוף**. חלקים הצבועים בארגמן, בשילוביו עם צבעים אחרים (הנותנים ורוד וסגול), נותן בפרחים רבים את הגמישות לכיפוף הנחוצה להן. למשל במשפחות **הגרניים, הפעמוניותיים, הזיפניים, השפתניים, האירוסיים והסחלביים** (ראו [5]). גמישות מסוימת לכיפוף, בנוסף על עמידות בלחץ, דרושה גם ברגליהן הארוכות של **החסידות והפלמינגו** הישנות על רגל אחת. מכאן רגליהן הוורודות. ללא הגמישות לכיפוף היה עליהן לנוח על שתי הרגליים. אך במקרה כזה, כל רוח קלה, מלפנים או מאחור, עלולה להפיל אותן. הרכות של פנים **האבטיח** אדום, ארגמני או ורוד, היא דוגמא קלסית להבדל בתכונות הפיסיקליות של צבעים אלה ביחס לירוק. קיימות דוגמאות רבות של פירות אשר תוכם בצבעים הארגמניים והשילובים של ארגמן, בעוד שקליפתם ירוקה. אך לא מצאתי עדיין דוגמא לפרי שתוכו (הבשרי) ירוק וקליפתו אדומה. אפילו במקרה של פירות **קפה** מסוימים, הקליפה אמנם אדומה אך מה שירוק בפנים הם הגרעינים הקשים. כלומר, אפילו מקרה זה מחזק את טענתי. נציין עוד כי כאשר האבטיח מבשיל הופך תוכו הלבן בהדרגה לאדום. תהליך זה מלווה בלחצים פנימיים אדירים ולכן הצורך בקליפה חזקה (הירוקה) העמידה בפני חיתוך. הלחצים בתוך האבטיח אינם שווים בכל כיוון (בשל המשקל הלוחץ כלפי מטה). לכן, בקליפת האבטיח חשובה העמידות לגזירה יותר מאשר החוזק למתיחה. מה גם שבמהלך ההתפתחות של האבטיח קליפתו צריכה להמתח כדי שהאבטיח יתנפח אך אסור שהקליפה תבקע, כלומר דרוש חוזק לחיתוך. על מידת עוצמתם של הלחצים הגדולים בתוך אבטיח נקל לעמוד בעת שמבקעים אבטיח בשל.

תכונה **חומנית**: **התפשטות בחום**. דוגמא לתכונה זאת של צבעי ארגמן ניתן לראות למשל בעלי הכותרת של הפרח **צבעוני ההרים** עליו נרחיב בהמשך. עלי הכותרת של פרחים רבים נוספים בצבעי ארגמן ואדום מתרחבים ומשנים את צורתם כתוצאה מעליה חדה במעלות החום.

תכונה **אופטית**: **קליטת ירוק והחזרת אדום וכחול ואולי גם החזרת א"א ו/או א"ס**.  
תכונה **לחותית**: **בידוד מיובש**. על תכונה זאת הסקתי מכך שבמדבריות היבשות  
באמריקה שלצבעי העור של הילידים המקומיים (שבטי אינדיאנים מסוימים)  
מתוסף גוון אדמדם.

תכונת **חדירות**: **אי-חדירות לגבישים בתמיסות (??)**. זאת השערה ראשונית שלי  
שיש לבחון אותה בהירות.

#### ד) צהוב.

תכונה **מכנית**: **חוזק בחיתוך** (גזירה). פרחים צהובים רבים נראים לי כחזקים יותר  
בפני חיתוך מאשר פרחים אדומים-ורודים או כחולים-סגולים. עלה כותרת אדום  
של **פרג אגסני**, למשל, יותר עדין וניתן לחיתוך מאשר עלה כותרת צהוב של **חרצית**  
**עטורה**.

תכונה **חומנית**: **שימור חום**. מבחינה פיסיקלית המינוח "שימור חום" מתייחס  
למקדם קיבול חום גבוה. פירוש הדבר שלאחר שמחממים חומר בעל קיבול חום  
גבוה, עובר זמן רב יחסית עד שהוא מתקרר. דוגמא קלסית הוא ה**תיירס** הנמכר  
בדוכנים ברחוב. דוגמא נוספת: החלמון הצהוב של ביצה קשה מתקרר לאט יותר  
מהחלבון הלבן שלה. מרבית המאבקים של הפרחים הם בעלי צבע צהוב או שילוב  
של צהוב, כגון כתום. שמירת הטמפרטורה של המאבקים חשובה ביותר עבור  
התפתחותם.

תכונה **אופטית**: **בליעת כחול והחזרת אדום וירוק**. **תתכן גם החזרת א"א ו/או**  
**א"ס**. על חשיבות תכונה אופטית זאת נעמוד כאשר נדון בפרחים צהובים.  
תכונת **לחות**: **בידוד מלחות**. השערה זאת נוצרה אצלי כאשר נוכחתי כי לעורם של  
ילידים באזורים לחים מאד, כמו במזרח הרחוק, מתוסף גוון צהוב. בהמשך נראה  
חיזוקים להשערה זאת.

תכונת **חדירות**: **אי-חדירות למולקולות נוזליות (??)**. הכונה במינוח "מולקולות  
נוזליות" כאן היא לחומרים מסיסים במים. דומני שעורן של צפרדעים מכיל  
גבשושיות בגוונים בהם יש תוספת צהוב. יש צורך ברור של עור צפרדעים רבות  
להתגונן בפני חומרים רעילים מבחינתן המצויים בשפע בביצות.

#### ה) תכול.

תכונה **מכנית**: **גמישות בפיתול**. ניתן לראות כושר פיתול גבוה בעלי כותרת תכולים  
בתהליך הסגירה של הפרחים **מקור החסידה הגדול, חבלבל עדין, אלקנה סמורה**  
ועוד.

תכונה **חומנית**: **התכווצות בקור**. גם תכונה זאת ניתן לראות באותם פרחים  
תכולים בעת הסגירה בלילה שלהם. כל הסגירה המיוחדת שלהם מתאפשרת עקב  
התכווצות משמעותית בשעה שהטמפרטורה בסביבה צונחת.

תכונה **אופטית**: **בליעת אדום, החזרת ירוק וכחול**. **תתכן גם החזרת א"א ו/או**  
**א"ס**. על חשיבות תכונה אופטית זאת נעמוד כאשר נדון בפרחים תכולים.  
תכונת **לחות**: ??? עדיין לא מצאתי.

תכונת **חדירות**: **אי חדירות למולקולות גזיות ???** הכוונה כאן למולקולות  
המרחפות באויר שחדירתן לעור או לגוף עשויה להזיק לחי או לצומח. מולקולות  
כאלו מתגלות בד"כ על ידי חוש הריח. אך יש גם כאלו שאין להן ריח, כלומר שגלאי  
הגז של בעל החי או המצח אינו מבחין בהם. עבורם במיוחד חשובה ההגבלה של  
כניסה בלתי רצויה לגוף. אני מניח שלחומרים בעלי צבע תכול, ובעיקר אם הם  
קרובים יותר לכחול, המרווחים בין מולקולות החומר קטנים יותר מאשר  
בחומרים הצהובים. לכן אני מיחס דווקא לתכול את התכונה של חסימת  
מולקולות גזיות.

#### ו) שקוף

תכונה **מכנית**: **קלילות משקלית**. קורי העכביש הם הדוגמא הקלסית. אך אין  
להתעלם גם מהכנפיים השקופות של שפיריות וחרקים אחרים להם דרושה קלילות  
משקלית במידה רבה יותר מאשר אצל חרקים אחרים בעלי כנפיים צבעוניות.  
תכונה **חומנית**: ??? עדיין לא מצאתי.

תכונה **אופטית**: **העברת כל הצבעים ואולי קליטה ו/או החזרה של א"א ו/או א"ס**.  
תכונת **לחות**: **דחיית לחות**. די להסתכל על טיפות המים המצטברות על קורי  
עכביש בבוקר שלאחר לחות גבוהה בלילה כדי לעמוד על תכונה חשובה זאת.  
תכונת **חדירות**: **אי-חדירות למים**. לו היתה חדירות למים לא היו מצטברות  
טיפות מים על קורי עכביש, קורים של זחלי פרפרים וכדומה.



ח) **ירוק**. צירוף חצי-חצי של תכונות הצבעים צהוב ותכול. אני מביא תכונות של ירוק בשל תפוצתו הרבה של צבע זה בעולם הצומח.

תכונות **מכניות**: **חוזק לחיתוך בנוסף לגמישות לפיתול**. מרבית העלים בטבע ירוקים. כדי שהעלה יבצע תיפקודו חשוב מאד שהוא לא יקרע (יגזר) עקב רוחות. אם בודקים עלים שונים בגוונים שונים של ירוק נוכחים בד"כ כי ככל שהעלה יותר ירוק הוא עמיד יותר בפני חיתוך. קליפות של פירות רבים מכילות צבע ירוק בגוונים שונים. הזכרנו לעיל את קליפת האבטיח הירוקה כדוגמה לחוזק לחיתוך. כנפי חרקים מסוימים העפים מהר ירוקות אף הן. גם כאן חשוב שהכנף לא תיקרע במגבלות התעופה של החרק. גם בעלים וגם בכנפי פרפרים יש צורך בחיזוקים נוספים כדי שהם לא יתכופפו. נשים לב לדמיון הרב בין צורת העורקים בעלה וזו של כנף פרפר. לגבי תכונת הגמישות לפיתול של חלקים ירוקים: גבעולים ירוקים מתפתלים כדי לאפשר לפרחים רבים להיות בכיוון השמש. גם הפניה של עלים בצמחים רבים לכיוון השמש מלווה בתנועות פיתול. כמו כן, כאשר דורכים על גבעול ירוק נוכחים כי הוא גמיש לפיתול ובעל חוזק לחיתוך.

התכונות **החומניות**: שימור חום בנוסף להתכווצות בקור. תכונת שימור החום היא כנראה אחת הסיבות הפיסיקליות העיקריות לצבע הירוק של העלים. לתכונת ההתכווצות בקור עשויה להיות חשיבות מכרעת בעת שהטמפרטורות הסביבתיות יורדות ונחוץ לחסום את פליטת החום שנצבר בתוך העלה.

התכונות **האופטיות**: **בליעת כחול ואדום והחזרת ירוק**. מסופקני אם יש החזרה של א"א או א"ס. אם היתה החזרה כזאת הייתי מצפה לקבל צבע אחר. למשל, אם היתה החזרה גם של א"א הייתי מצפה לקבל משילוב של אינפרא-אדום וירוק צבע כתום או אפילו צהוב. תלוי באיזה אורך גל נתון האינפרא-אדום. במידה והיתה החזרה של גם של אולטרה-סגול, בנוסף לירוק, הייתי מצפה לקבל צבע כחול או אולי אפילו סגול. שוב, תלוי באורך הגל של הא"ס ובעוצמות היחסיות של הא"ס והירוק.

התכונות **הלחותיות**: **בידוד מלחות ו-???**

תכונות **חדירות**: **אי-חדירות למולקולות נוזליות בנוסף לאי-חדירות למולקולות גזיות**. סבורני שזאת אחת התכונות החשובות ביותר של הירוק. נדמיין לרגע חלקה בשדה ובה צמחים מסוגים שונים. האזור כולו רוחש תנועות של מולקולות גזיות ונוזליות. לצמחים רבים חשוב למנוע כניסת חומרים זרים למערכותיהם. הצמחיה הירוקה היא הנפוצה ביותר וטבעי שהיא מוגנת בנושא זה. יצויין כי לא מן הנמנע שגם החרקים המצויים בתוך אותה צמחיה צריכים להתגונן בפני מולקולות גזיות ונוזליות אלה. לכן לרבים מהחרקים שם הצבע העיקרי הוא ירוק. כלומר, הירוק של אותם חרקים נובע מצרכים פיסיקליים ראשוניים ולא דוקא לשם הסוואה.

הרחבתי כאן במקצת על תכונות הירוק בשל החשיבות הרבה של צבע זה בצמחים. לגבי יתר הצבעים אסתפק במה שצוין בטבלאות ובהפניה למדריכים של פרחי הבר של שמידע [5], [6] המסודרים לפי צבעים.

כפי ששילוב צבעים נותן צבע מסוים, כך שילוב תכונות פיסיקליות עשוי לתת תכונה פיסיקלית מסוימת. למשל, אני מייחס לצבע השחור תכונה מכנית של "אלסטיות למתיחה". כאמור, את הצבע השחור ניתן לקבל משילוב שלושת צבעי החיסור ארגמן+צהוב+תכול. התכונות המכניות שייחסתי לשלושת צבעי החיסור הללו הם: לארגמן – "גמישות לכיפוף". לצהוב – "חוזק לחיתוך". לתכול – "גמישות לפיתול". שילוב שלושת התכונות המכניות הללו נותן את התכונה המכנית אלסטיות. הערכת זאת מבוססת על הקשרים הפיסיקליים בין ארבעת התכונות הללו כפי שהם באים לידי ביטוי בתורת החוזק והאלסטיות, ראו למשל [46].

עתה, כשיש בידונו טבלאות קישורים בין הצבעים לבין התוספות בתכונות הפיסיקליות, הנקשרות עם אותו חלק צבוע, אנו יכולים לשוטט בטבע עצמו ובספרות העניפה על בעלי חיים וצמחים, ולנסות להבין מהם המשימות המיוחדות המוטלות על כל חלק וחלק כדי שאותו בעל חיים או צמח ישיגו את סל המזונות החיוני להם.

אני שב ומזכיר כי הקישורים שביצעתי, בין צבעים בחי ובצומח לבין תכונות פיסיקליות, הם בגדר של רעיונות ראשוניים לדיון וחקירה מעמיקה ואין לראות בהם עובדות שהוכחו. אני מקווה כי עצם הצגת האפשרויות לקישורים כאלו תתרום להרחבת כיווני החשיבה הן אצל ציבור חובבי הטבע והן אצל אנשי המחקר בביולוגיה ופיסיקה.

#### א.4) שיטת תשע האזורים

בגופים ביולוגיים רבים ניתן להתייחס לאזורים הבאים לפי מה שאכנה להלן "שיטת תשע האזורים": (1) האזור הסמוך לחיבור; (2) האזור המרכזי; (3) האזור המרוחק מהחיבור; (4) אזור השפה הקדמית; (5) האזור האמצעי; (6) אזור השפה האחורית; (7) אזור הצד העליון; (8) אזור התווך הפנימי; (9) אזור הצד התחתון.

בגופים בעלי צורות קוויות נתייחס רק לשלושת האזורים הראשונים. בגופים בעלי צורות משטחיות לעיתים קשה להבחין באזור השמיני. לכל אחד מתשעת האזורים עשויים להיות תפקידים מיוחדים - ובהתאם לכך מבנה, הרכב וצבעים מיוחדים. כל אזור מהתשע עשוי להתחלק אף הוא לתת-אזורים אשר לכל תת-אזור התפקידים, המבנה, ההרכב והצבעים המיוחדים לו. כל תת-אזור ניתן לחלק לתת-תת-אזורים וכן הלאה. כלומר ניתן לרדת לכל רמת פירוט, תלוי באיזו הגדלה בוחרים. בהמשך נשתמש במילה "חלק" אך הכוונה היא גם לתת חלק וכו'. מעתה, בכל פעם שאנו רואים צבע שונה בבעל חיים או בצומח עלינו לשאול את השאלות הבאות: א) לאיזה חלק מגוף החי או הצומח הוא שייך? ב) מהם התפקודים של אותו חלק? ג) על אילו מכשולים החלק צריך להתגבר? ד) מה הדרישות הפיסיקליות שניתן לצפות מאותו חלק כדי שהוא יתגבר על המכשולים? ה) כיצד ומאלו חומרים ניתן לצפות שהחלק יהיה בנוי? ו) מה השפעת המבנה והחומרים על הצבע של אותו חלק? ז) כיצד עוזר או מפריע הצבע של החלק לשרידותו של בעל החיים או הצומח?

בהמשך נראה מספר דוגמאות של פרחים ובעלי חיים תוך התייחסות לשאלות אלו ואחרות. נביא גם דפי חקירה עצמית בנושאי פרחים ובעלי חיים.

#### פרק ב: סודם הפיסיקלי של צבעי הפרחים

##### 1. ב. תפקודי הפרחים על סמך מעקב אישי

הדעה המקובלת היום היא כי רוב הפרחים נועדו למשוך בעלי חיים כדי שאלה יעזרו בתהליך העברת המאבקים מפרח לפרח. אך האם זוהי מטרתם הראשונית של הפרחים? פרק זה בא להצביע על האפשרות, הנובעת ממעקב תצפיתי ראשוני במשך מספר שנים, בעיניים של פיסיקאי, כי מבנה הפרחים, צבעיהם, ריחם ותנועותיהם נועדו כנראה למטרות פיסיקליות בסיסיות הנדרשות להתפתחותם התקינה של המאבקים, צלקות העלי והביציות. אמנם, אין להתעלם מכך כי בעלי החיים מנצלים את שפע המזון שנוצר בפרח למטרותיהם. בכך הם גם עוזרים בעקיפין בתהליך ההאבקה, אם כי לא אחת נתקלים בפרח הרוס עקב ביקור בעל חיים בו. יתכן שגם התערבות זאת של בעלי החיים השפיעה במהלך האבולוציה על קצב התרבותם של צמחים מסוימים - מה שאולי גרם לתלות הדדית מסוימת בין הצמחים לבין בעלי החיים. אך אין בקשרים אלה, בין בעלי החיים והפרחים, כדי לתת הסבר מלא ומשכנע לכל צורה, צבע וריח המופיעים בכל הפרחים. מה גם שיש צמחים רבים ללא פרחים (חשופי הזרע) אשר התרבותם אינה תלויה בקיומם של בעלי החיים, אלא ברוחות ובתנאים פיסיקליים אחרים. לעומת זאת, אם מתבוננים על הפרחים מנקודת הראות הפיסיקלית, ניתן לתת הסבר מלא לכל פרט ופרט בפרח, ולא רק בו אלא בצמח כולו, ובהרחבה רבה יותר, בכל הצומח והחי.

לאחר שעברתי על דוגמאות רבות של פרחים שונים, אשר הצלחתי למצוא עבורם הסבר פיסיקלי פשוט המבטל את הצורך לחפש הסברים בעזרתם האדיבה של בעלי החיים, ניתן להניח את ההנחה האכסיומטית כי **כל צמח דואג בכל רגע להווה שלו עצמו בלבד**. דהיינו ללא תכניות לעתיד וללא קשר לקיומם של צמחים אחרים או בעלי חיים. כל פעולותיו של הצמח, כולל פעולות פרחיו, עוזרות לביצוע התהליכים הביולוגיים והכימיים בצמח עצמו הדרושים בכל רגע ורגע לטובתו של הצמח.

בספר זה נתרכז בעיקר בפסיקה של הפרחים למרות שיש גם הרבה להסביר על הפסיקה של כל הצמח. הפרח הוא איבר הרבייה של צמחים עילאיים מכוסי זרע. הפרח בנוי בד"כ משלושה חלקים עיקריים: **עטיף, אבקנים ועלי**, אם כי יש פרחים ללא אחד המרכיבים הללו, (ראו תאור כללי ב**שרטוט מס' ...**). העטיף מורכב מעלי **גביע**, ירוקים בד"כ, ומעלי **כותרת** שהם בד"כ צבעוניים. ידוע כי עלי כותרת שונים מחזירים גם קרניים אולטרה-סגוליות, בנוסף על הספקטרום הנראה. לא בכל פרח קיימים שני סוגי העטיפים. כל אבקן, דהינו האיבר הזכרי של הפרח, מורכב משני חלקים: **זיר ומאבק**. המאבק מכיל את גרגרי האבקה שהם הגמטות הזכריות. העלי, דהינו האבר הנקבי של הפרח, בנוי משלושה חלקים: **שחלה, עמוד עלי וצלקת**. הצלקת קולטת את גרגרי האבקה הזכריים והם צריכים לנבוט בה בטרם ירדו דרך עמוד העלי אל השחלה, שם הם מפריים את הביציות אשר בהמשך מבשילות לזרעים. כל חלק באברי המין של הצמח צריך להגיע לרמת התפתחות מסוימת כדי שיוכל למלא את יעודו במועד המתואם עם התפתחות יתר החלקים. לכן התזמון כאן חשוב. כמו ביצור מוצרים מיוחדים בבית חרושת כך גם תהליכי היצור של האבקנים והביציות בטבע דורשים תנאים פסיקליים מתאימים. כנראה שתהליכי יצור המאבקים והביציות דורשים תנאים פסיקליים אופטימליים בגבולות מצומצמים יותר מאשר תהליכים אחרים בצמח, ולשם כך המבנים המיוחדים של הפרחים ותנועותיהם המיוחדות. בפרחים רבים יש גם צוף במקומות שונים. אני מתיחס אל הצוף כאל חלק מהחומרים הדרושים בתהליכי היצור בפרח. גם בחי ניכרות הדרישות לתנאים מוגדרים להתפתחות התאים המיניים. ניתן לשער כי לשם התפתחות הגמטות הזכריות בבעלי חיים דרושה טמפרטורה נמוכה במקצת מזאת של כל הגוף. אצל יונקים רבים בא הדבר לידי ביטוי בשק האשכים החיצוני של הזכרים. לעומת זאת הביציות הנקביות דורשות, להערכתי, טמפרטורה קצת יותר גבוהה מזאת של יתר הגוף. לכן עליהן להתפתח במקום מוגן בתוך הגוף, כגון השחלה. בעלי החיים יכולים לתמרן את עצמם כך שגופם יהיה בסביבה בעלת טווח הטמפרטורות המתאימות להם, למשל במחילות ומערות (זוחלים ויונקים), שינוי כסות חורף-קיץ (ציפורים ואדם), או שחיה במקום נוח יותר (דגים). אולם הצמחים, כבודדים, אינם יכולים לשנות את תנאי הסביבה המידית שלהם. לכן, לשם פיתוח התאים המיניים דרושים להם מנגנונים אחרים מאשר אצל בעלי החיים. הפרחים מספקים, להערכתי, את התשובה של הצמח לצרכי שמירת טווחי התנאים הפסיקליים הדרושים להתפתחות אברי המין שלהם.

לכל צמח סל המזונות שלו, הכולל חומרים וקרינות, בהתאם למצע עליו הוא גדל ולתנאים האקלימיים והאופטיים שלו. אברי המין מיצרים את שרשרות ה-DNA ויתר החומרים המסוימים הדרושים להתפתחות הצמח של הדור הבא, כך שהוא יוכל להתגבר על המכשולים הספציפיים של אותו זן צמח להשגת תפריט המזונות שלו. הפרח הוא המכשיר של הצמח ליצור המדויק של הדור הבא. לכן, המסקנה שלי היא **כי לכל סל של מזונות יש צמח המנצל את הסל. לכל צמח יש פרח** (או אבר רבייה אחר) **מותאם שממנו נוצר הפרי המיוחד של הדור החדש של אותו הצמח.**

התנאים הפסיקליים להתפתחות אברי המין בצמח עשויים לכלול: טמפרטורות חום וקור מתאימות; תאורה בעצמה ובאורכי גל מתאימים ביום, בלילה, בשמים בהירים ומעוננים; לחות ויובש במידות הנכונות; רוחות ולחצי אור בכיוונים הדרושים; צפיפויות אור נאותות, ועוד. מבין התנאים הפסיקליים האלה אציין בראש וראשונה את **הטמפרטורה**. יש מחקרים רבים המסבירים את חשיבות שינויי הטמפרטורה, מחום לקור ולהיפך, לתהליך הפריחה עצמו. סביר להניח כי גם במשך חיי הפרח, תוך כדי הבשלת המאבקים והביציות, יש חשיבות רבה ביותר לשינויים הנכונים של הטמפרטורה בסביבות המאבקים והביציות. תהליכים כימיים-ביולוגיים מסוימים בפרח מסוים דורשים טמפרטורה אופטימלית מסוימת. תהליכים כימיים-ביולוגיים אחרים, באותו פרח, דורשים טמפרטורות אופטימליות אחרות. ערכתי מעקב בשדה במשך מספר ימים, ביום ובלילה, בימים קרים של מרץ 1992 באיזור להב שבנגב. התבררו לי הנקודות הבאות: **כל הפרחים באותו אזור ובאותם ימים, ללא קשר לצבע, היו סגורים בלילות**. הפרחים **הסגולים והכחולים** נסגרו אחרונים לקראת לילה ונפתחו ראשונים עם בוקר. פרחים **אדומים**, כגון **כלניות**, נפתחו אחרי הסגולים ונסגרו לפניהם. פרחים **צהובים**, נפתחו אחרי האדומים ונסגרו לפניהם. פרחים **כתומים (צפוני חתול)** נפתחו אחרונים (09.00 בערך) ונסגרו ראשונים (15.00 בערך). כאשר אין שמש ו/או יש רוח - הפרחים נפתחים מאוחר יותר. המסקנות שהסקתי: כל הפרחים מתפקדים על סמך תאום אור וטמפרטורה. ביום הם קולטים אור וחום, בלילה הם מגינים על החלקים הפנימיים בפני רוח וקור. לאחר מעקבים נוספים במשך השנים האחרונות אחרי התנהגותם של עלי הכותרת של עשרות סוגי פרחים, ביום ובלילה, בשמיים בהירים או מעוננים,

במידות שונות של לחות, ובעוצמות וכיווני רוח שונים, אני מגיע למסקנה ראשונית כי **הפרח כולו הוא ווסת חום וקור משוכלל ומתוחכם ביותר**. לשם ויסות החום והקור נעזר הפרח בחוקי בידוד פיסיקליים ידועים ובתכונות השתנות נפחם של חמרים שונים בטמפרטורות שונות, ובמידות לחות שונות. בנוסף לכך, מבנה עלי הכותרת של פרחים רבים מצביע על כך כי יש שימוש בפרח גם בחוקים **אופטיים** ידועים, בדומה להגברה של אנטנות רדיו וטלויזיה בצורות שונות, עליהן נדבר בהמשך.

## 2.ב שיטות בידוד חום וקור בפרחים

בויסות הטמפרטורה לוקחים חלק כל חלקי הפרח וכל חומריו. בפרחים רבים עלי הכותרת נפתחים ונסגרים בטכניקות שונות ומדהימות כדי ליצור אזור מבודד סביב המאבקים בשכבת בידוד אחת או במספר שכבות, בדומה למה שאנו עושים בלבישת בגדים. אך בטבע הפתרונות הרבה יותר מתוחכמים. כדי להבין את המכניזמים המשוכללים בהם משתמשים הפרחים לשם ויסות הטמפרטורה, נתיחס כאן תחילה לפרחים פשוטים אשר להם **ששה** עלי כותרת זהים, כדוגמת **צבעוני ההרים** ( **תמונה מס'.** ) ותמונה מקורבת של **צבעוני השרון** ב-[38]. כידוע האויר הוא מבודד חום מעולה והמים הם מוליכי חום מעולים. במשך היום סופגים המאבקים כמות גדולה של אנרגיה מהשמש ומהסביבה. בלילה, כאשר הטמפרטורה הסביבתית יורדת מתחת לטמפרטורה האופטימלית הדרושה להתפתחות המאבקים, נסגרים שלושת עלי הכותרת הפנימיים ונוצר סביב המאבקים תא קטן סגור המכיל אויר. חלק מהחום הנקלט ע"י המאבקים במשך היום נפלט לחלל התא הקטן. כדי שיהיה בידוד טוב של התא כלפי חוץ עוטפים שלושת עלי הכותרת החיצוניים את התא הקטן אשר קירותיו הם עלי הכותרת הפנימיים. בכך נוצרות שתי מעטפות, פנימית וחיצונית. האויר הלכוד בין שתי המעטפות מבודד את התא מהקור החיצוני, בדיוק כפי שעושה האויר הלכוד בין הגופיה לבין החולצה שאנו לובשים. אולם בידוד זה לא יהיה יעיל אם החולצה תהיה רטובה. שכן המים המצויים בחולצה מוליכים את החום הפנימי החוצה. באותו אופן, הבידוד של עלי הכותרת לא יהיה יעיל אם הם יהיו חזירים למים. ואכן, **עלי הכותרת של פרחים רבים דוחים מים**, כפי שאפשר ללמוד בטבע מהעובדה כי טיפות המים הקטנות על עלי הכותרת נשארות בצורה כדורית. ראו למשל בתמונה מס' ... של **רקפות** לאחר גשם. אם ניקח פיפטה ונזליף בעזרתה מים על בד רגיל – המים יספגו בבד ולא ישארו בצורת טיפות. בד כזה חדיר למים ואינו יעיל לבידוד בפני רטיבות. לעומת זאת, הזלפת טיפה על זכוכית או חרטינה תיצור טיפות כדוריות. סגירת הפרח על ידי ששת עלי הכותרת נותנת בידוד מעולה למאבקים המצויים בתא הקטן. אם יש הפרש טמפרטורות גדול, בין הסביבה שמחוץ לפרח לבין הסביבה הסמוכה למאבקים, יתכנו פתרונות שונים. למשל, הפתרון של מספר שכבות בידוד. במקרה של שכבת בידוד אחת - כל פתח קטן עלול לגרום דליפת כל החום החוצה. לעומת זאת פרח עם הרבה עלי כותרת, כגון ורד, יכול לתת בידוד רב שכבתי. פתרון נפלא אחר יכול להיות **"שמירת פוך"** למאבקים, כפי שקיים אצל **אדמונית החורש** (תמונה מס'...). המצויה בסביבות קרות ולחות יחסית. זהו פרח נדיר בישראל אשר ניתן לראותו פורח באפריל-מאי בחורש הגלילי ובמיוחד בהרי מירון. ראו גם תמונה של **איריס ארם נהריים** ב-[17] בה רואים בבירור את האבקים ואת השערות על עליה הכותרת הסגול, כאשר השער מוכתם באבקה צהובה של המאבקים. מתקבל הרושם שהשערות מגינות על המאבקים כאשר עלי הכותרת סגורים (ראו גם [5]). תמונות גדולות של איריסיים ניתן לראות, למשל, ב-[17] ו-[38]. באופן כללי, אם הטמפרטורה החיצונית סביב הפרח קטנה אך במעט מהטמפרטורה האופטימלית הדרושה למאבקים, לא יסגר הפרח כולו אלא רק סגירה חלקית. אנו רואים עתה כיצד הפרח יכול לשמש כווסת טמפרטורה משוכלל ביותר. אצל **הכרוסוס** (Crocus) מוכרת התופעה באיזורים מושלגים באירופה שבה הפרח נסגר ונפתח על פי השינויים בטמפרטורה. הכרוסוס מגיב לשינויי טמפרטורה בהבדלים של 0.5 מעלות צלסיוס בלבד. יש בידי עלון פרסום של חברה אירופאית המשווה את רמת הדיוק של הטרמומטר שלה לרמת הדיוק של הכרוסוס בחורף. התושבים באותם אזורים יודעים בחורף מהי הטמפרטורה בחוץ בהסכלם בעד לחלון על מידת הפתיחה של פרח הכרוסוס. ראו תמונה מס' ... של **כרוסוס חורפי** בישראל. באלפים מוכרת תופעה נוספת שברצוני להדגיש כאן. הצמח **אדלויס** (Adelweiss) (בתרגום – לובן אצילי) [3] שגבעולו מכוסה לבד לבן וגם תחתית העלים מרופדים בכיסוי לבד. הדרישות הקיצוניות של טמפרטורה ורוחות קרות בהרי אירופה ואסיה הביאו להתפתחותו של פרח בעל יופי קיצוני אשר הפך לסמלה הלאומי של שווייץ. השיר הידוע עליו ("אדלויס") מוכר לרבים מהסרט "צלילי המוסיקה".

נחזור לצבעוני שלנו. כיצד הוא "יודע" כי הטמפרטורה ירדה וכי הוא צריך לסגור את עלי הכותרת? האם באמצעות חישנים מיוחדים, כדוגמת החישנים בטרמוסטט. ואם כן היכן מצויים אותם חישנים? ברור שהם צריכים להיות חיצוניים וקרובים לאזור המאבקים. האם יתכן כי המאבקים עצמם הם החישנים? או שמא צלקת העלי משמשת כחישן טמפרטורה. אפשרות אחרונה זו לא נראית לי כסבירה מאחר ויש צלקות עליים בפרחים רבים הרחוקים מהמאבקים. גם לא נראה לי סביר שהמאבקים הם החישנים. ראשית, בטכנולוגיות מיכשור לויסות טמפרטורה החישן מופרד בד"כ מהגוף עליו מגינים. גם בעורנו יש חישני חם וקור מיוחדים למרות שהמטרה היא לשמור על טמפרטורת החלקים הפנימיים. שנית, גם אם נניח כי המאבקים הם החישנים, כיצד הם יחושו את העליה בטמפרטורה החיצונית בהיותם כלואים בתוך התא הקטן? כלומר החישנים צריכים להיות למעשה מחוץ לפרח. אולי ניתן היה לחשוך בעלי הגביע, אלא שדוקא בצבעוני הם מצויים רחוק מהפרח. אם כך אולי רעיון החישנים במקרה זה לא עובד. אז צריך לחפש מכניזם שונה לסגירה ופתיחה של עלי הכותרת. ואכן דומני שניתן להצביע לפחות על שיטה אחת עבור הצבעוני, אשר אינה מצריכה קיום חישנים והמאפשרת להסביר תופעה כזו: בתחתיתו של כל עלה כותרת מצוי כתם שחור גדול הבולט על הרקע האדום. לחסידי הגישה על תפקיד הצבעים בפרחים למשיכת חרקים יש הסבר משלהם על תפקידו של צבע שחור זה. אולם לי נראה כי תפקידו הבסיסי של הכתם הוא לעזור במנגנון הסגירה והפתיחה של הפרח. גם מבלי לבדוק באופן כימי מדויק, ברור לי כי הכתם השחור מורכב מחומרים השונים במשהו מהחומרים המרכיבים את הרקע האדום של עלי הכותרת. אחרת, אם הם היו זהים בהרכבם, במבנה המולקולרי ובתכונות המבניות שלהם, אזי לדעתי גם צבעם היה צריך להיות זהה. אם הם שונים בצבעיהם אזי קרוב לודאי שיש הבדלים ביניהם גם בתגובה לשינויי טמפרטורה. משיקולים פיסיקליים שונים נראה לי שניתן להניח שמקדם ההתפשטות החומני של הכתם השחור נמוך ממקדם ההתפשטות החומני של החלק האדום. לכן החלק האדום יושפע יותר משינויי טמפרטורה. נראה כיצד ניתן להסביר בכך את המכניזם לסגירה ופתיחה של הצבעוני. הפרח פתוח בשעת צהריים ביום בהיר. עלה הכותרת מתוח וגם הכתם השחור מתוח. עם ערב מתחיל להתכווץ הכתם השחור שבתחתית העלה. בגלל הצורה המסוימת של העלה וההבדלים במידת ההתכווצות מתעגל החלק האדום ויחד עם שלושת עלי הכותרת האחרים, המתעגלים במקביל, נוצר אט אט התא הקטן הפנימי הסגור במידה המתאימה. כלומר שהצבע השחור שימש כאן גם כחישן וגם כמבצע את פעולת הסגירה ללא כל גורם מתווך אחר. אנו רואים כאן טכניקת סגירה אחת. נכנה אותה כאן בשם "סגירה כדורית" למרות שצורת התא הקטן יכולה להיות גם כצורת אגס. את הסגירה הכדורית ראיתי לא רק בצבעוני אלא גם בפרחים נוספים כגון **כלניות ופרגים**.

טכניקת סגירה שניה ניתן למצוא בפרח בעל חמישה עלי כותרת. בערוב היום, אפילו לפני השקיעה, ניתן לראות את צורת סגירתו המיוחדת. חמשת עלי הכותרת מתפתלים זה בתוך זה כמו תריסים נעים. באופן זה כל עלה כותרת מקיף מספר פעמים את המאבקים ונוצרות מספר שכבות ביזוד מצוינות. נכנה סגירה זו בשם "**סגירה תריסית**". הרבה פרחים, אשר להם חמישה עלי כותרת, משתמשים בטכניקה זו כגון **מקור החסידה, פשתה שעירה, מעוג כרתי וחמצין נטוי**. במהלך הסגירה הזו נוצרים קיפולים אורכיים עדינים בעלי הכותרת. פסי הצבע האורכיים המודגשים באזורי הקיפולים מרמזים על חיזוק מבני מיוחד באותם קוים, כפי שניתן לצפות מסיבות מכניות מבניות. כלומר, לקוים יש משמעות פיסיקלית עצומה לפרח עצמו. לדעתי, קוים אלה אינם "דרכי דבש" מיוחדות כדי לכוון את החרקים אל הצוף, אלא הם דרושים לפרח גם אם לא היו קיימים בעלי חיים.

טכניקת סגירה שלישית, ניתן לראות בפרחים בעלי סירה ומפרש, כגון **בקיה תרבותית**. הסירה עוטפת גם במשך היום את המאבקים, היושבים על זירים ארוכים. עם רדת החשכה מתקפלות שתי אוונות המפרש ועוטפות את הסירה. בכך נוצר הבידוד הכפול עליו דיברנו לעיל. נכנה סגירה זו בשם "**סגירה מפרשית**".

יש גם פרחים הנסגרים ע"י "**קיפול זרועות**" כמו למשל **זהבית השלוחות**.

אציין עוד כי צמחים עם תפרחות קרקפתיות, אשר בהיקפם יש פרחים לשוניים בצבעים צהוב או לבן, ובקרקפת יושבים פרחים צינוריים צהובים או כתומים, כגון **חרצית עטורה, סביון אביבי, קחון מצוי וחמנית**, עושים רושם במבט ראשון כי הם אינם נסגרים בלילה אלא דוקא נפתחים. זאת משום שהפרחים הלשוניים שבהיקף מתקפלים לאחור. **בסביון האביבי** רואים בבירור את ההתכווצות המגולגלת לאחור, המתגברת ככל שהטמפרטורה יורדת. עלתה בדעתי האפשרות כי התמתחות זו של הפרחים הלשוניים לאחור מותחת את המצעית

של הקרקפת וגורמת בכך לסגירת החלקים העליוניים של הפרחים הצינוריים שעליה. הסמיכות הרבה של פרחים צינוריים אלו עוזרת גם היא לשמירת הטמפרטורה. תופעה מעניינת נוספת של הפרחים הלשוניים הללו היא עקיבתם במשך היום אחר כיוון השמש. ניתן להסביר תופעה זו בכך שאם הפרח אינו מכוון אל השמש אז בחלק מהפרחים הלשוניים נופלת, על צידם הפנימי המבריק, עוצמה גדולה יותר של קרני שמש, בגלל הזווית המתאימה, מאשר על הצד הפנימי של חלק אחר של פרחים לשוניים. מי שמקבל יותר שמש מתחמם יותר ואז סיבי הגבעול באותו צד מתארכים יותר. לכן יש כיפוף של הגבעול לכיוון השמש. ערכתי בדיקה ראשונית בחרציות. במספר פרחים קטפתי צד אחד של הכתר, למשל את הצד המזרחי. נתקבלה מידת כיפוף שונה מזאת של הפרחים שלא נקטפו. ככל שמספר הפרחים ההיקפיים באותו פרח גדול יותר כן יכול הפרח לדייק יותר במעקבו אחר השמש. בחרציות ספרתי 11-13 פרחים היקפיים, כלומר יש ביכולתם לדייק במעקב עד כדי סטיה של כ-10 מעלות בלבד ביחס לשמש. בפרחים שיש להם רק ארבעה עלי כותרת כושר העקיבה נמוך יותר.

באחד האביבים עקבתי אחר שעות הפתיחה והסגירה של שני סוגי פרחים ממשפחת המרוכבים. **קחון מצוי**, בעל עלי לשוניים היקפיים **לבנים** ופרחים זעירים צהובים במרכז, ו**חרצית עטורה**, בעלת עלי לשוניים היקפיים **צהובים** ופרחים זעירים צהובים במרכז. בשניהם העלים הלשוניים ההיקפיים משתפלים לאחור לעת ערב ומורמים חזרה בבוקר אל עבר כיוון השמש. אך בקחון הם משתפלים לפני אלה של החרצית ועולים בבוקר מאוחר יותר מאלה של החרצית. בשדה נוכחים שקצב עליית העלים הלשוניים ההיקפיים של הקחון נקבע על ידי עוצמת השמש ומידת החום. ביום מעונן הם עשויים להשאר מושפלים לאחור עד הצהריים ולעיתים אף לא לעלות כלל. כמו כן נוכחתי כי בלילות חמים במיוחד הלשוניות הצהובות של החרציות נשארו מורמים למרות שבד"כ בלילות רגילים הם מושפלים לאחור. תופעות אלו מעוררות אצלי את הרושם שתנועות העלים הלשוניים ההיקפיים בפרחים אלה מושפעות מהתפשטות, עקב חום, של נוזלים המצויים בסיבים המחברים את הלשוניות אל הפרח כולו.

באביב אנו נתקלים הרבה בצמחים קוציים המפתחים קרקפות יפות של הרבה פרחים סגולים כגון **גדילן מצוי** (תמונה מס'...), **ברקן סורי**, ועוד. המבנה המיוחד של תפרחות אלו הזכיר לי רדיאטור לקרור. באחד הימים החמים הלכתי ומדדתי את הטמפרטורה בתוך תפרחת כזאת והתברר לי כי היא אכן נמוכה יותר מאשר הטמפרטורה הסביבתית. דרוש מחקר מעמיק יותר כדי לבדוק האם זאת דרכם של הצמחים הללו להוריד את הטמפרטורה בימות החם.

כל התופעות הנ"ל מצביעות על כך כי הפתיחה והסגירה של הפרח קשורה להיותו וווסת חום וקור. כדי לבצע את פעולות הסגירה והפתיחה השונות בפרחים צריכים עלי הכותרת להיות בעלי התכונות מכניות מתאימות. בטבלה 3 ניתנו קישורים בין צבעים לתכונות מכניות. על חלק מהקישורים הללו בפרחים עמדתי בפרק א'. מקוצר היריעה לא ארחיב בנושא כאן ורק אכוון את הקוראים אל מדריכי הפרחים המסווגים לפי צבעים, כגון המדריכים של שמידע [5], [6]. מעניין להיווכח כי הפרחים בעלי צבעי הבסיס והקרובים אליהם, בטבלה 2, הם הנפוצים ביותר בישראל. על פי [5], כ-23.5% מהפרחים בחבל הם התיכוני הם בצבע וורוד, כ-19% פרחים צהובים, כ-15% פרחים לבנים, מספר גדול של פרחים בצבע קרם (צהוב בהיר), ובשילובים של לבן וצהוב (כגון **קחון מצוי**) ועוד פרחים רבים בשילובים של שלושת אלה. ראו למשל בתמונה של הרקפת את צבעי הארגמן-ורוד וכיצד מתחזק הצבע באיזור הכיפוף. כזכור, בטבלה 3 קישרנו את צבעי הארגמן-ורוד לתכונה המכנית רגישות לכיפוף. לעומתם בולטים במיעוטם הפרחים שיש בצבעיהם ערוב של שחור, כגון אדום, כחול, חום וסגול-שחור, בורדו וכו'. צבעים אלה דרושים כנראה רק בפרחים שנדרש בהם גם חוזק למתיחה, אותו מקנה השחור. כגון, **כלנית**, **נורית אסיה**, **צבעוני**, **פרג**, **מרגנית השדה**, **לוענית מצויה**, **לוף ארצישראלי**, **דבורניות**, **איריסיס** ועוד, כפי שאפשר לראות גם ב-[6].

### 3.ב עקרונות אופטיים באנטנות ומנחי גלים ושימושם בפרחים

שיטות הבידוד השונות הננקטות על ידי הפרחים אינן מסבירות עדיין את תפקידיהם של הצבעים המיוחדים של עלי הכותרת. לשם מניעת חזירות של מים פנימה לתוך התא המבודד די לפרח אם יש על פניו שכבת מיגון שעוותית או חומרים דוחי מים אחרים, כפי

שאכן יש בפרחים רבים. שכבה זו בין היתר מוסיפה לברק של עלי הכותרת. חסידי הגישה האומרת כי הפרחים נוצרו כדי למשוך בעלי חיים יראו בצבעים המיוחדים של עלי הכותרת משום תמיכה חזקה לטענתם. אולם אם מנסים ללכת בגישה האומרת כי הצמח מפתח כל דבר לצרכיו הפיסיקליים והביוכימיים, הרי שעלינו לחפש הסברים אחרים לצבעיהם של עלי הכותרת. הסתכלות דרך משקפיו של פיסיקאי מאפשרת מציאת הסברים מעניינים למדי לכל נושא הצבעים בפרח. בסעיף הקודם דנו במספר תכונות מכניות של הפרחים, הקשורים בצבעיהם, בהתאם לטבלאות 3-8. כפי שנראה בהמשך, מה שמאפיין את הפרחים היא העובדה שהם עושים שימוש ניכר גם בתכונות האופטיות של הצבעים, כפי שהן משתקפות מטבלה 5.

לפרחים רבים, אשר להם חמישה זירי מאבקים, יש גם חמישה עלי כותרת. לא אחת ניתן להיווכח כי כל זיר צמוד בתחתיתו לבסיסו של עלה כותרת. אם קורעים עלה כותרת יורד אתו גם זיר של מאבק. כאשר קורעים את כל עלי הכותרת נשארים עם עמוד העלי בלבד המחובר לשחלה. עובדה זו עשויה להצביע לדעתי על כך כי עלי הכותרת משתתפים בתהליכים הביוכימיים הדרושים בהבשלת המאבקים. כפי שבתהליכים המתרחשים בעלים הירוקים יש חלק נכבד לאור באורכי גלים מתאימים, כך ניתן לצפות כי בתהליך המסובך של הכנת המאבקים יש השתתפות של פוטונים של אור באורכי גל אשר ניתן לצפות כי יהיו שונים בהרכבם מאורכי הגל המשמשים את העלה הירוק. כידוע, המאבקים הם נושאי הגמטות הזכריות. הם נושאים בתוכם את הצופן הגנטי להתפתחות הדור הבא. לכל צמח יש את הצופן הגנטי שלו. לכן בעת הכנת הגמטה במאבק נחוצים חומרים מוגדרים מאד בתזמון מדויק. נראה לי כי עלה הכותרת ינצל את גלי האור המגיעים אליו בעוצמות שונות ובאורכי גל שונים בהתאם לעונות השנה, מצב העננים וכמות הצל, כדי לעזור בתהליכי היצור של הגמטות במאבקים. מכל התפריט האופטי המגיע אל עלה הכותרת הוא יקלוט וינצל לצרכים הביוכימיים אורכי גל מסוימים. את אורכי הגל האחרים הוא יחזיר. תערובת הצבעים המוחזרים נותנת כידוע את הצבע של עלה הכותרת. ניתן אם כן, לפחות בעיקרון, למצוא מהם האורכי הגל המנוצלים ע"י עלה הכותרת מתוך מדידת אורכי הגל המגיעים אליו בדרך כלל בעת הפריחה בטבע, והפחתת אורכי הגל המוחזרים. החומרים הנוצרים בעלה הכותרת, עקב ניצול אורכי גל מסוימים, עשויים להיות מוזרמים לתחתית הזיר עליו יושב האבק ומשם הם יכולים לעבור אל הגמטות ולעזור בהתפתחותם. זאת היא פעולה ביוכימית. בנוסף אליה מצאתי אפשרות לקיום פעולה ביאופוטית בפרחים. הצבעים המוחזרים מעלי הכותרת עשויים להיות מרוכזים ומוגברים, ולהגיע אל המאבקים עצמם, וגם אל צלקות העלי והשחלה, בדרכים אופטיות מגוונות. במגוון הפרחים בהם נתקלתי ניתן למצוא את כל חוקי ההגברה של אנטנות רדיו וטלויזיה בצורת שונות. החוקים הפיסיקליים באנטנות מקשרים בין אורכי הגל למידות הפיזיות והמבנה של האנטנות השונות ומנחי הגלים (WAVEGUIDES).

לאלה מבין הקוראים אשר שכחו, או לא למדו, את העקרונות הבסיסיים של האופטיקה ואנטנות התקשורת, אביא כאן בקצרה מספר תכונות החשובות לענייננו בספר זה. המעוניינים לקבל רקע עמוק יותר מוזמנים לעיין בספרים על תורת האור, למשל [1], ואנטנות, למשל [7], [14] ובאנציקלופדיות.

הפרחים מנצלים, להערכתך, את התופעות האופטיות הרבות בצורות המיוחדות לכל פרח ופרח. בין התופעות האופטיות המנוצלות, להערכתך, ע"י הפרחים אציין: (א) סוגי הקרניים מתוך הספקטרום. (ב) קרינה ישירה. (ג) בליעה והחזרה. (ד) קרינה עקיפה של צבעים מוגדרים באמצעות החזרות ממשטחי עלי הכותרת. (ה) הסתרת המאבקים והשחלה מפני קרינות לא רצויות. (ו) סינון קרינות לא רצויות. (ז) הגברת קרינה ע"י החזרה מרוכזת ממשטחים גאומטריים מוגדרים. (ח) פיזור. (ט) קיטוב. (י) הובלת גלים אופטיים בסיבים. (יא) שידור קרינה. נתעכב מעט על כל אחת מהתופעות.

על **סוגי הקרניים מתוך הספקטרום** דנו בפרק א. כאן נדגיש כי הצבעים בפרחים יכולים להיות צבעי חומרים (פיגמנטים) או צבעי מבנה. עלי הכותרת של פרחים צבעוניים רבים מנצלים אורכי גל מסוימים ומחזירים את היתר. כך למשל, כאשר אנו מתבוננים בפרח כחול פירוש הדבר שעלי הכותרת מנצלים את מרבית הספקטרום הנראה בתחום הגלים הפחות אנרגטיים - דהינו אדום וירוק - ומחזירים את הכחול. בפרח צהוב, לעומת זאת, מנוצלים הגלים האנרגטיים יותר, דהינו אלה מהתחום הכחול-סגול ומוחזרים האדום

והירוק. מכאן, שלפי צבע הפרח ניתן להסיק גם על הצרכים האנרגטיים שלו בהתאם לשעות היום ועונות השנה. למשל בחורף רואים הרבה פרחים אדומים. פירוש הדבר שעלי הכותרת מנצלים את הקרינות האנרגטיות ביותר מתוך הספקטרום, דהיינו מהירוק עד הסגול, ולעיתים אף באולטרה-סגול. לעומת זאת, באביב ובקיץ רואים פרחים כחולים וסגולים רבים (**ברקן, זרדר וכו'**). כלומר, במקרים אלה די לעלי הכותרת בקרינה הפחות אנרגטית, דהיינו מהתחום הירוק - אדום. זאת כנראה משום שחום הסביבה כבר מקנה לעלי הכותרת חלק מהאנרגיה הדרושה לתפקודו, בעוד שעודף אנרגיה, מהתחום הכחול-סגול, עלול אולי להפריע לתפקודו ועודף זה נפלט מהפרח. מעניין לציין בעניין זה כי בכתף החרמון ראיתי ביוני 1998 הרבה תפרחות כחולות של **קיפודן מצוי**. כמו כן ראוי לציין את הזירים הסגולים של **הצלף הקוצני**, את הקרקפת הסגולה של **הקרקדה המכסיפה**, את הפרחים הסגולים הגדולים של **החוטמית הרפואית** וכן את **קיטבליה חרמונית** הסגולה. גם את עלי הכותרת הכחולים של **רומוליאט השלג** ראוי שנזכיר, על פי התמונה בספר של זהרוני [40]. לא מן הנמנע כי פרחים אלה מחזירים את הקרניים הכחולות, הסגולות והאולטרה-סגולות המצויות בעוצמה רבה בהרים הגבוהים. שם כידוע האטמוספירה דלילה וקרני השמש מגיעות לקרקע בעוצמה חזקה.

פרחים לבנים עשויים לקלוט את כל הספקטרום בעוצמות מסוימות ולהחזיר עוצמות מופחתות של כל הספקטרום. אפשרות אחרת היא לקלוט מתוך הספקטרום את אורכי הגלים האולטרה-סגולים, ו/או האינפרא-אדומים, ולהחזיר את אורכי הגל הנראים, דהיינו מאדום ועד סגול. חלק שחור קולט את כל הספקטרום ואינו מחזיר דבר או שהוא מחזיר בתחומים הבלתי נראים, אולטרה-סגול ו/או אינפרא-אדום.

#### ב) קרינה ישירה, בליעה והחזרה.

השמש נותנת קרינה ישירה בצבע לבן, שניתן להתייחס אליו כאל תערובת של שלושה צבעים ספקטרוניים כחול, ירוק ואדום. כל חלקי הצמח החשופים לשמש קולטים קרינה ישירה. חלק מהקרינה נבלעת ומנוצלת, וחלקה האחר מוחזר. בשקיעה ובזריחה הקרניים המגיעות לפרח נוטות יותר לכיוון האדום. גם בחורף יש נטיה לכיוון האדום. נסתפק כאן בתכונות כלליות אלו. הרוצים להעמיק יותר מוזמנים לעיין למשל ב-[22]. קרניי שמש שהתפזרו באטמוספירה נותנים את צבע התכלת לשמיים בהירים או צבעים לבנים לעננים שאינם מעובים מידי. פרחים עשויים להנות גם מקרינה ישירה של השמיים, דהיינו מקרינה באזור הכחול. פרחים כאלה עשויים להתגלות באור שמש כפרחים צהובים מאחר והם בולעים את הכחול ומחזירים את הירוק-אדום. מכאן מובן מדוע הפרחים הצהובים נפוצים כל כך. הם מנצלים לא רק את הקרינה הישירה של השמש אלא יש ביכולתם לנצל גם את קרינת השמיים, בעלת תכונת הקיטוב החשובה, עליה נדבר בהמשך.

#### ג) החזרה והגברה.

חוקי החזרה של האור ממשטח חלק דומים להתנהגות כדורי ביליארד. כאשר קרן אור פוגעת במשטח חלק (כגון במראה שבחדר האמבטיה) זוית החזרה שווה לזוית הפגיעה (ראו **שרטוט מס'...**). אם המשטח החלק קעור בצורה מסוימת, למשל כמו צלחת, כל הקרניים הבאות מרחוק בכיוון מאונך למישור הצלחת (קרניים מקבילות) מוחזרות דרך נקודה אחת הנקראת "מוקד". (ראו **שרטוט מס'...**). מיקום המוקד תלוי במבנה הצלחת. לכן בנקודת המוקד יש הגברה גבוהה מאד של הקרניים. הדבר דומה לריכוז קרניים ע"י עדשה בנקודת המוקד שלה. קרניים הבאות מכיוונים אחרים אל הצלחת מוחזרות אל מקומות שונים וביניהם אל תחתית הצלחת (ראו **שרטוט מס'...**). באנטנות לקליטה מלווינים שמים לעיתים קרובות באזור המוקד קופסה הנקראת מנחה גלים (WAVEGUIDE), אשר פתחה מופנה לכיוון המלחת. את מנחי הגלים הללו בונים בצורות שונות כגון פירמידה, קונוס (כמו משפך או שופר פשוט) ושילובים שלהם. מנחה הגלים מוביל את הגלים הא"מ פנימה. בחצוצרת נגינה, למשל, עושים עם גלי הקול פעולה הפוכה. גלי הקול מונחים מהקצה הדק (הפיה) עד לפתח הרחב כאשר בדרך הם עוברים שינויים פיסיקליים התלויים למשל במבנה החצוצרה, בחומרים מהם היא מורכבת, בנקודות הלחיצה של האצבעות - המאפשרות מצבי תהודה שונים בחצוצרה - ובגורמים נוספים המוכרים לנגנים. אחד העקרונות החשובים בגלים הוא היפוך מהלך הקרניים. למשל, אם אדם רואה את עיני רעהו



דרך המראה – גם רעהו רואה את עיניו של אותו אדם דרך אותה הנקודה במראה. באנטנות מביא עקרון היפוך זה לחסכון רב. זאת מאחר ואותה אנטנה יכולה לשמש הן לשידור והן לקליטה. לכן, התופעות המוכרות לנו בחוצרה קורות גם בכיוון הפוך, דהיינו שגלי קול יכולים להכנס דרך הפתח הרחב ולהתמקד בתח הצר, כמו באוזן. תופעות דומות קורות גם בגלים א"מ במנחי גלים. חלק מאורכי הגלים המגיעים מהאנטנה אל הפתח הרחב של מנחה הגלים מועברים פנימה אל מערכת גלאים מסוגים שונים. גלאים אלה יוצרים אותות חשמליים כאשר פוגעים בהם פוטונים באורכי גל מסוימים (בדומה לקורה בתא פוטואלקטרי המותקן בדלתות מעליות). צורת מנחה הגלים קובעת אלו אורכי גל ימשיכו ויוגברו עד הגלאים ואלו יסוננו ויחסמו.

על פי הגישה הפיסיקלית, עלי הכותרת של פרחים מסוימים משמשים כאנטנות ומנחי גלים הדומים בעקרונותיהם לאלו של גלי רדיו וטלויזיה המוכרים לנו. **עלה כותרת בצבע מסוים מחזיר את קרני האור של אותו הצבע.** המבנה של עלי הכותרת עשוי להוביל את קרני האור, בצבע המוחזר, אל עבר המאבקים והשחלה בדרכים מתוחכמות מאד, אשר הטכנולוגיה הנוכחית של תחילת המאה ה-21 עדיין רחוקה מישום טכנולוגי שלהם. כדי ללמוד את סודם של הפרחים כדאי להתעכב כאן במקצת על מספר חוקים בסיסיים של אנטנות.

אחד הפרמטרים החשובים באנטנות צלחת היא מידת ההגברה (GAIN). זהו היחס בין כמות האנרגיה שהיתה מגיעה אל הגלים המוחזרים דרך המוקד לבין כמות האנרגיה שהיתה מגיעה אל המוקד לו לא היה החזר (או במקרים מסוימים – חסימה). מידת ההגברה, G, של אנטנת צלחת תלויה בעיקר בשני גורמים: באורך הגל **המוחזר** ע"י האנטנה,  $\lambda$ , ובקוטר הצלחת, D, (הנתון ביחידות של  $\lambda$ ). הקשר ביניהם הוא:

$$(1) \quad G = K(D^2/\lambda^2)$$

באשר, K הוא קבוע, בדרך כלל קטן מ-1, התלוי גם במידת החזרה של המשטח וגם במידת הקעירות של אנטנת הצלחת. הערך של K באנטנות צלחת טלויזיוניות רבות הוא בסביבות 0.5. בפרחים הערך של K עשוי להיות קטן יותר. הנושא לא נחקר עדיין למיטב ידיעתי. הדגשתי כי בנושא ההגברה מדובר בגל המוחזר. זאת בניגוד לאורך הגל הנקלט ע"י הפרח. עקיבת-שמש, למשל, נעשית בעקבות הגלים **הנקלטים**. ההגברה מתבצעת על הגלים המוחזרים. למשל, פרח צהוב קולט מקרני השמש את אורכי הגל בסביבות הכחול-סגול ומחזיר את היתר, דהיינו מירוק עד אדום. בהמשך נדון במחקרים שהוכיחו כי אכן עקיבת השמש נעשית בעקבות הכחול ולא בעקבות האדום. נשים לב גם כי במשוואת ההגברה (1) מופיע הקוטר D בחזקה שניה במונה ואילו אורך הגל  $\lambda$  מופיע בחזקה שניה במכנה. אם למשל מגדילים את הקוטר פי 2 גדלה ההגברה פי 4. לעומת זאת, אם אורך הגל הפוגע יורד מאדום ( $7000 \text{ \AA}$ ) לסגול ( $4000 \text{ \AA}$ ) (ראו **טבלה 1**) מוכפלת ההגברה פי 3. תכונה זאת משפיעה כנראה על קוטרי הפרחים המותאמים לאנרגיות ולצבעים הדרושים להם. נדון להלן במספר דוגמאות.

כאשר אנטנת צלחת לקליטה מלווינים בקוטר של 30 מ' קולטת אורך גל של 6 ס"מ (מהתחום המוכר לאנשי תקשורת לווינים כ-C-BAND) תתן הגברה לפי משוואה (1) עם  $K=0.5$  של  $G=1.25 \cdot 10^5$ . בעוד שההגברה של פרח בעל קוטר 2.5 ס"מ בצבע צהוב באורך גל של  $5800 \text{ \AA}$  (ראו **טבלה 1**) תהיה, עבור אותו  $K=0.5$ ,  $G=0.9 \cdot 10^9$ . כלומר ההגברה של הפרח הזה היא פי 10,000 מאשר הגברת האנטנה שבדוגמא. זאת הסיבה לכך שמנסים בתקשורת לווינים לעבור לגלי אור (ליזר). את ההגברה החסרה בטכנולוגיה הנוכחית של אנטנות משלימים ע"י מגבירים אלקטרוניים והתקנים אחרים. בטבע, ההגברה הגבוהה באמצעות קרני אור מאפשרת לפרחים להיות יעילים גם כאשר עוצמות הקרינה יורדות. לכן, למשל פרחים רבים נשארים פתוחים במשך היום גם כאשר יש עננים. כמו כן יכולים הפרחים להסתפק ברצועות צרות יחסית של מחזירי אור, ולא בצלחת שלמה, כמו למשל בפרחים **זהבי השלוחות, סתוניות**, ועוד. חישוב דומה לזה

שעשינו לעיל יראה כי כדי לקבל את אותה ההגברה של הפרח הצהוב שבדוגמא, אך עבור פרח צלחת **אדום**, בעל אורך גל  $6200 \text{ \AA}$  דרוש קוטר **גדול** פי 1.14 מזה של **הצהוב**. אך עבור פרח צלחת **כחול**, באורך גל של  $5000 \text{ \AA}$  ניתן להסתפק בקוטר **קטן** פי 1.34 מזה של **הצהוב**. מטבלה 1 ניתן לחשב שעבור פרח צלחת **סגול** הקוטר יהיה קטן עוד יותר מזה של **כחול**, כל זאת, כאמור, עבור אותה ההגברה. אנו רואים כאן את אחת הסיבות החשובות מדוע פרחי צלחת האדומים גדולים לעיתים קרובות מפרחי צלחת צהובים. בעוד אלה האחרונים גדולים מפרחי צלחת כחולים וסגולים. הסיבה הפיסיקלית, המסתתרת מאחורי המשוואות, נעוצה באנרגיה הגבוהה יותר של הפוטונים בעלי הצבעים בתחום הסגול-כחול לעומת הצבעים בתחום אדום-צהוב. סיבות נוספות לצורך בפרחים אדומים גדולים יחסית ניתן למצוא בכמויות האנרגיה של גלים א"מ בצבעים השונים, המגיעות אל הפרח בהתאם לשעות היום, עונות השנה, תכסית השטח וכו' בכל אזור גאוגרפי. על עוצמות הקרינות בכל עונה באורכי גל שונים ניתן לראות למשל ב-[9] ובאנציקלופדיות. בעקרון, ככל שהזווית בין כיוון השמש לכיוון האופק יותר קטנה כן יש החלשות של עוצמות הגלים בתחום הכחול סגול ביחס לצבעים בתחום האדום. לכן, למשל השמיים אדומים בכיוון השמש השוקעת. ככל שעוצמת הקרינה בצבע הדרוש חלשה יותר, כן זקוק הפרח הצלחתי לקוטר גדול יותר כדי לקלוט אותה כמות של אנרגיה. לכן, למשל, פרחים אדומים הפורחים בחורף בסביבה מסוימת צפויים להיות גדולים יותר מפרחים אדומים הפורחים באביב באותה סביבה, ואם לא כך הדבר - משמע שהמאבקים יכולים להסתפק בכמויות קטנות יותר של אנרגיה כוללת עד להבשלתם המלאה. למשל קוטר **הכלנית**, הפורחת בינואר עד מרץ הוא 5 ס"מ ויותר [8]. לעומת זאת קוטר **נורית אסיה**, הפורחת אחרי הכלנית, במרץ-אפריל, הוא רק 4-5 ס"מ [5]. **אדמונית החורש** לעומת זאת מקבלת פחות אנרגיה, בגלל היותה בחורש, ולכן קוטרה גדול אפילו מזה של הכלנית ומגיע ל-10 ס"מ [8]. **הדמונית קטנת הפרי** האדומה, פורחת בשטחים פתוחים במרץ-אפריל ומשנה את כיוונה במהלך היום כך שהפרח פונה תמיד לכיוון השמש. קוטרה הקטן, כ-1 ס"מ [8], מבהיר את הצורך בעקיבה מתמדת אחר השמש. בדרך הזאת, כמות האנרגיה הכוללת שהיא צוברת עשוי להשתוות או אולי לעלות על הכמות שצוברת הכלנית. מאחר ופרח הדמונית קטן יותר - קל לצמח לסובב את הפרח בכיוון השמש, דבר שמאפשר להקטין עוד יותר את הקוטר, וחוזר חלילה עד שמגיעים לסף תחתון שמתחת לו האנרגיה הנצברת אינה מאפשרת הבשלת המאבקים בזמן הדרוש על פי חילופי העונות. גם **הפרג** הוא בצורת צלחת אדומה. אך שם יש גם אפקט של הסתרת הקרניים הסגולות, כפי שנאה בהמשך, ולכן ההשוואה שלו עם פרחי הצלחות האדומות האחרות אינה פשוטה.

**הצבעוני** אמנם נמנה עם הפרחים האדומים אך צורתו דומה יותר לצורת פעמון ויש לדון בו במסגרת הצורות המסובכות יותר מאשר צורת הצלחת. גם באנטנות בצורת פירמידה או משפך תלויה ההגברה בשטח המפתח החיצוני. אך כאן מידת ההגברה עשויה לעלות בעשרות אחוזים על זאת של אנטנת צלחת פשוטה. אין פלא איפא שבטבע יש פרחים רבים בצורת משפך (**חבלבל**), פעמון (**פעמונית**), שופר (**עכנאי**), משפך מאורך (**כדן**), פירמידה עם פינות מעוגלות (**מרווה משולשת**) ועוד צורות נפלאות אשר בטכנולוגית האנטנות הנוכחית עדיין לא מוכרות אך בצמחים יש להן שימוש אופטי רחב, כפי שניתן להתרשם מתאור המודולים של צורות הפרח [5].

ג) **רשתות**. בצמחים רבים יש פרחים מרוכבים, כדוגמת **חמנית**, **סביון**, **חרצית**, **קחוו**, **קיצנית כרתית** (ראו תמונה מקורבת בעמ' 102 ב-[38]), ועוד, המזכירים מאד את אנטנות הרשת. אנטנת רשת מורכבת מהרבה אנטנות בודדות אשר יש קשר בין המערכות האלקטרוניות שלהן דרך מרכז בקרה משותף (**תמונה** מס'...). בצורה זאת ניתן לקבל, למעשה, אנטנה אחת גדולה בעלת קוטר גדול ככל שרוצים ולקבל הגברה גדולה, כפי שהסברנו לעיל במשוואה (1).

ד) **הסתרה וסינון**. על פי המבנה והתנוחות של משפחות פרחים מסוימות מתקבל אצלי הרושם כי הן נעזרות בתופעות של הסתרה וסינון של אורכי גל מוגדרים.

למשל, **פרפרניים**, **לוענתיים**, **איריטיים**, **דגניים**, **סחלביים** ועוד. רמז בולט לאפשרות של סינון קרינה ראיתי בפרחים הסגולים של העץ **סגלון חד-עלים** [45], המשמש כעץ נוי. הפרחים של הסגלון הם בצורת שופר מעוקם והם בד"כ במצב אופקי כך שפתח השופר מקביל לקרקע או כלפי מטה. החלק העליון הפנימי של עלי הכותרת שלהם הוא בצבע לבן, וגם למאבקים יש צבע לבן. הסקתי מכך כי הפרח מונע מהמאבקים לקבל קרינה שמש ישירה של מרבית הקרניים, אך הוא מעביר כנראה דרך החלק העליון הלבן רק קרינה אולטרה-סגולה. בנוסף לכך, מוגברות אל המאבקים קרניים סגוליות ואולטרה-סגוליות מקרינת **שמיים** הנכנסת דרך פתח השופר האופקי. הקרינה הזאת מוחזרת מספר פעמים בתוך השופר עד שהיא מגיעה למאבקים. כידוע פרח זה אוהב שמש מובהק ורגיש לקור. בעץ זה העלים מנוצים פעמיים ובצורתו החיצונית הוא מזכיר (לפני פריחה) את **הצאלון הנאה**, [45], בעל הפרחים האדומים הגדולים. אלא שהפרחים של הצאלון שונים לחלוטין ופונים מעלה לכיוון השמש. מכאן אנו יכולים להעריך את מאמציו של הפרח הסגול לסנן את הקרניים האולטרה סגוליות עבור המאבקים שלו. להפתעתי, נוכחתי גם בתופעת סינון בפרח צלחת **פרג אגסני** (ראו **תמונה מס' 1**). לפרח זה 4 עלי כותרת אדומים. בקרינת שמש ישירה נסגרים שני עלי הכותרת הפנימיים כך שהם מסתירים את השמש מהמאבקים הסגולים-שחורים (ראו **תמונה מס' 11** ב-[5] שם תופעה זאת מודגשת בצילום). עלי כותרת אלו מעבירים אל המאבקים את אורכי הגל הקרובים לאדום אך הם **מסננים את אורכי הגל הקרובים לסגול ואולטרה-סגול**. המאבקים משתמשים כנראה בכל הספקטרום המגיע אליהם פרט לאורכי הגל סגול ואולטרה-סגול, אותם הם מחזירים. לכן המאבקים נראים סגולים-שחורים. ראו גם תמונה גדולה של **פרגה אדומה** בעמ' 117 ב-[38]. לא מן הנמנע שגם פרחים של צמחי קיץ, כגון דרדרים, מסננים את הקרינה המגיעה למאבקים החבויים עמוק בתוך הפרחים של התפרחת. בנושא של הסתרה וסינון חשוב להתבונן היטב בפרחים ממשפחת **הסחלביים**. ראו, למשל, תמונות גדולות של **דבורנית הדבורה ודבורנית גדולה** ב-[38]. צר לי לקלקל את הסיפור היפה על ההצגה הנאה שעושה דבורנית הדבורה לזכרים של הדבורים, אך גם כאן התפקידים **הראשוניים** קשורים בצרכים הפיסיקליים של הפרח עצמו. זכרי הדבורים טועים אולי לחשוב שלפניהם דבורה, ואולי טעות זאת עוזרת לתהליך האבקה ושמידות הזן. אך גם מי שדבק "בגישה החברתית" יתקשה להסביר כיצד הפרחים הללו ידעו מהו מראה של דבורה ומה עליהם לשנות אצלם כדי להיות דומה לה, במטרה למשוך את הזכר. אוסיף גם כי תחום הראיה של הדבורים כולל את האולטרה-סגול ואינו כולל את האדום והכתום (ראו ערך "דבורים" ב-[3]). לכן, מהעובדה שלנו נראה שיש דמיון בין הפרח והדבורה אין להסיק כי אותו דמיון קיים גם בעיני הדבור. אני מניח שמדידת הספקטרום הנפלט מדבורה יתן תוצאה שונה מהספקטרום הנפלט מפרח הדבורנית. אם בכל אופן יש כמה דברים דומים, יש להתייחס לכך כרמז לתכונות פיסיקליות מסוימות הדומות בין הדבורה ופרח הדבורנית. (יש לי מספר רעיונות בנידון אך אני מעדיף להשאיר את משימת השוואת התכונות הפיסיקליות, בין הפרחים הללו ונקבות הדבורים, כחידת אתגר לקוראים. ארמוז כאן כי רצוי להעזר בטבלה 2). בדקתי בכתף החרמון את הפרחים הצהובים הכהים של **אחירותם החורש** (ממשפחת **הפרפרניים**). למיטב הבנתי, הם מסננים פנימה, אל האבקים והעלי הלבנים, אור צהוב בהיר. (ראו תמונותיו ב-[43]).

ה) **קיטוב**. באופטיקה ותקשורת מוכרות היטב תופעות הקיטוב בגלים א"מ. המושג "קיטוב" מתייחס לכיוון בו מתנדנד הגל. למשל גלי היס מתנדנדים מעלה-מטה ולכן הם בקיטוב אנכי. על תופעות הקיטוב וסיבותיהן הפיסיקליות המעניינות ראו למשל בפרק 9 של הספר "תורת האור" של [1]. כאשר אלומת אור טבעי, דהיינו אור לא מקוטב, פוגעת בזווית לא אנכית במשטח מחזיר, מוחזרות בעיקר הקרניים המקוטבות במישור מקביל למשטח. גם קרניים העוברות דרך מסננים מסוימים עשויים להיות מקוטבים. משקפי שמש רבים נעזרים בתכונה זאת. אור הרקיע הוא אור מפוזר ע"י המולקולות באטמוספירה ולכן הוא אור מקוטב, גם כאשר השמים תכולים בצהריים וגם כאשר הם אדומים בזריחה או בשקיעת השמש. דוגמא מוחשית לשימוש בקיטוב ניתן לראות על גגות בתים

רבים בהם יש אנטנות טלויזיה בצורת סולם. כולנו מכירים את אובדן הקליטה של תכנית טלויזיה מעניינת כאשר רוח חזקה מסובבת במקצת את האנטנה מכיוונה המדויק. אנטנות הסולמות הללו מקוטבות בד"כ אופקית, במקביל לקרקע.

אני חושד בפרחים שרובם נעזרים בתופעות הקיטוב של גלי האור בכל הספקטרום. חשדי התעורר כאשר נוכחתי כי המאבקים בפרחים רבים ערוכים בצורה מסודרת מאד, בתאום מלא עם כיווני המשטחים של עלי הכותרת או אנכית לקרקע - לקליטת קרינה מהרקייע. רואים זאת במקרים רבים, אפילו בתמונות הפרחים במדריכים השונים, כאשר המאבקים גלויים (למשל, **נר הלילה החופי, חבצלת הנגב, זהבית השלוחות, עכנאי, לוף, סיתונית הנגב,** ועוד). (ראו גם תמונה גדולה של **חבצלת החוף** בעמ' 99 ב-[38]). את פרחי **הלילי** רואים הרבה בגינות ובחנויות פרחים. שם התופעה בולטת במיוחד. יש גם מקרים רבים של קיטוב ע"י מסננים כאשר המאבקים מסודרים מתחת, או בתוך, עלי הכותרת, כמו למשל בפרחים בצבעי ורוד-סגול רבים (למשל **בקיה, מרות ירושלים, צהרון מצוי, אחירותם החורש** ועוד). האור המקוטב יעיל בהרבה מאור לא מקוטב בהעברת פוטוני האור בצבעים הרצויים אל אברי המין של הפרח. כאשר אני מתבונן במאות סוגי הפרחים בטבע ובספרות מתקבל אצלי הרושם שמטרתם הראשונית של הפרחים היא להשיג קרינה מקוטבת באורכי הגל הרצויים. אפילו אצל הפרחים שהדבר אינו בולט מייד, כמו במשפחת **השפתניים**, ניתן בהתבוננות מעמיקה להתרשם שהפרח שואף להשיג קרינה מקוטבת.

(ו) **הנחיית גלים אופטיים בסיבים.** מתקבל אצלי הרושם שהזירים ועמודי העלי של פרחים רבים מובילים קרני אור ממקום למקום, בדומה למעבר בסיבים אופטיים בטכנולוגיה. בטבע מוכרת דוגמא ידועה של הובלת אור מהעלים העליוניים של התירס אל הזרע והשורשים שבקרקע. נשים לב שהזירים של פרחים רבים הם שקופים במידה מסוימת ולכן מתאפשר לאור לחדור פנימה ולהיות מובל לכיוונים הדרושים. במקרים רבים נוכחתי כי צבע הזירים קרוב לצבע החלק הפנימי של עלי הכותרת. למשל, **בשושן צחור** הצבע הפנימי לבן עם פסים חלשים של צבע ירקרק. צבע הזיר הוא לבן-ירקרק-שקוף. לעומת זאת **בשושן אדום** בגינת ביתי צבע הזיר אדום-שקוף. נוכחתי גם שהזירים של הפרחים הסגולים הקטנטנים בתפרחת הכדורית של **שום גבוה** סגולים אף הם. דוגמאות נוספות יובאו בהמשך.

(ז) **דיפולים.** לרבים מאתנו מוכרות האנטנות על הגגות בצורת סולמות (אנטנות דיפולים) באורכים של עשרות ס"מ המיועדים לקלוט שידורי טלויזיה קרובים באורכי גל של עשרות ס"מ (ראו למשל [14]). ככל שמספר השלבים בסולם גדול יותר כן גדול ההגבר. אורך המוט צריך להיות  $1/4$  אורך גל, או  $1/2$  אורך גל או אורך גל שלם. מדהים להיווכח כי גם לאנטנות כאלו יש את המקבילות המתאימות בטבע. בדגניים רבים יש מוט ארוך המחובר לזרעים המתבשלים, הנקרא מלען. במלען זה יש קוצים זעירים המסודרים בצורה כזאת שאם מעבירים את היד בכיוון הזרע נתקלים בשיני משור. אם הולכים הפוך אין התנגדות. בספרות מוסברת התופעה כזכרו של הצמח להחזיר את הזרע לאדמה. אין ספק שהדבר עוזר גם בנושא החדרת הזרע. אולם לא מן הנמנע, להערכתי, כי המטרה הראשונית של זיזים אלו היא הגברה של אורכי גל בתחום האינפרא-אדום בסביבות 15-25 מיקרון. זהו תחום של גלים אלקטרומגנטיים המבטאים טמפרטורות בתחום של כמה עשרות מעלות צלסיוס מעל ומתחת לאפס. דהינו טמפרטורות השוררות הן באזורים טרופיים פתוחים בעלי רוחות חזקות והן באזורים קרים ופתוחים לרוחות כגון הסטפות של דרום-רוסיה. אם יסתכלו על מלען כזה במכשיר הגדלה מתאים יראו תבנית דומה לאנטנת תקשורת עם מוטות הולכים וקטנים (תמונה מס'...). להערכתי במלען באורך של כ-20 ס"מ יש למעלה מ-100,000 מוטות זעירים (תמונה מס'...). לוא היו שמים מספר כזה של מוטות מתכת באנטנה אחת היא היתה נותנת להערכתי הגברה המאפשרת קליטת אותות רדיו רחוקים מאד, אולי אפילו מגלכסיה רחוקה.

ח) **שידור קרינה**. לישראל "עלה" מחופי טקסס, לפני למעלה מ-1000 שנים נר הלילה החופי (תמונה מס'...). פרח זה נפתח לקראת לילה ומסיים את חייו במהלך היום. אפשר לראות אותו בישראל גם בשעות הבוקר המאוחרות בחולות חוף הים התיכון. הפרח צהוב, בקוטר 5-7 ס"מ. (ראו עמ' 152 ב-[5]). יש לו 4 עלי כותרת הנראים כבנויים משני חלקים כל אחד. שמונת האבקנים שלו מסודרים מול עלי הכותרת. 4 הצלקות גדולות ופרוסות כלפי מעלה. פרח מעניין נוסף נפתח רק לקראת לילה ונסגר בבוקר. זהו הפרח הלבן הגדול (מעל 15 ס"מ) של **חבלוב אינגנס**. (ראו תמונה בעמ' 138 בספר של שטיינמן [34]). צמח זה מבוית בישראל ודומה לקטוס. באמצע אחד הלילות של חודש יוני 1988, חזרנו אני ואשתי רחל מבילוי בנהריה ונתקלנו בחצר אחד הבתים בפרח לבן גדול של צמח זה הפתוח במלואו. רחל העירה כי יתכן שהפרח הזה אוהב קור. החלטתי לעקוב אחריו כדי לבדוק אפשרות מענינת זאת. למחרת בבוקר, בסביבות 08:00, הלכתי לראות האם הפרחים הלבנים הללו עדיין פתוחים. אך כולם כבר נסגרו ונשלו. אחד הדירים סיפר לי כי הפרחים נפתחים בלילה ונושרים ביום. הסיפור הזה הזכיר לי את סיפורו של נר הלילה החופי שאחריו עקבתי לא מעט במשך שנים לאורך החוף. החלטתי לעקוב אחר פרחי חבלוב האינגנס ביתר תשומת לב. מספר ימים לאחר מכן נשארתי בספריה של הפקולטה לחקלאות ברחובות עד שעות הערב והזדמן לי לעקוב מקרוב אחרי תהליך פתיחתם של הפרחים הלבנים הגדולים הללו. הפתיחה החלה ממש עם שקיעת השמש ב-19:30. שעה קודם לכן הם היו עדיין סגורים. שהייתי ליד הצמח כשעה שלמה ועקבתי מקרוב כיצד 25 הפרחים שלו נפתחים ממש לנגד עיני. זאת היתה חוויה מדהימה ומומלצת לכל חובב טבע. ברגעים מסוימים הבחנתי אפילו בתנועות ריתמיות של עלי הכותרת הלבנים במהלך הפתיחה. הפרחים כולם אופקיים בצורת צלחת גדולה. רק לצורך ההתרשמות, ספרתי באחד הפרחים 25- עלי כותרת וכ-20 צלקות. מספר האבקנים גדול בהרבה, כנראה מאות, ורובם מצויים בחלק התחתון של קערת הפרח, מתחת לעליים. עזבתי את הפרח בסביבות 20:30 כאשר הוא הגיע לכשלושת רבעי פתיחה, לקוטר שמעל 14.5 ס"מ. לא נשארתי עד סוף הפתיחה כי אותה כבר חזיתי בנהריה באמצע הלילה. מעניין לציין כי כל עוד היה קצת אור בשעת השקיעה באו לבקר את הפרח דבורים. אך ב-20:15 השמש כבר שקעה והדבורים לא נראו יותר. חרקים אחרים לא באו לבקר בפרחים אלה במהלך המעקבים שלי. מספר שבועות לאחר מכן גיליתי ליד ביתי בגינה את אותו הצמח הגדל ממש סמוך לקיר הבניין. מתברר כי בלילות חמים לא היתה פתיחה כלל ובלילה קצת יותר קריר הפתיחה החלה בשעת לילה הרבה אחרי השקיעה, בסביבות 21:00. למחרת בבוקר בסביבות 05:15 יצאתי לבקר את הפרחים שלי ביתי והתברר כי הם עדיין פתוחים לכדי מחצית מהפתיחה המלאה שלהם. כמו כן נוכחתי כיצד דבורים מבקרות בהם ואוכלות מהמאבקים. הדבורים לא ביקרו באותה עת בפרחים האחרים שהיו בסביבה. בשעה 06:40 הפרחים כבר היו פתוחים רק בכרבע מפתיחתם המלאה. השמש כבר זרחה אם כי הצמח עדיין בצל (הוא מדרום לבניין). הדבורים כבר לא נראות בשטח. בשעה 07:10 הפרחים הפונים מערבה עדיין פתוחים במקצת, אך כל הפרחים בכיוון מזרח כבר סגורים לגמרי, למרות שהצמח עדיין מצוי בצל. הדבר מרמז לי כי הפרח **נמנע מלקלוט** את הקרינה האולטרה-סגולה הבאה מזוית קטנה ביחס לכיוון השמש. בשעה 08:00 כל הפרחים סגורים, השמש כבר מגיעה על הצמח, ועלי הגביע של הפרחים הסגורים שבכיוון השמש מצויים בתהליך השחרה לקראת נשירה. ביקור הדבורים דווקא בפרח זה בשעות השקיעה והזריחה מרמז כי **הפרח מקרין לסביבתו קרינה אולטרה-סגולית חזקה**. כידוע, לדבורים ראייה טובה בתחום האולטרה-סגול. כל התצפיות הללו על פרחי **חבלוב אינגנס** מצביעים על כך כי הערתה האינטואיטיבית של רחל, בדבר האהבה של הפרח את הקור, היתה כנראה נכונה. אני נוטה לחשוד כי גם נר הלילה החופי נפתח לקראת ערב מסיבות הקשורות בחיפוש דרכים להתקרר. לא מן הנמנע כי שני הפרחים הללו, ואולי עוד כמה מבני מינם, עוברים תהליך יוצא דופן. הם מתקררים במהירות רבה ע"י פליטת חום מהירה, **במהלך לילה אחד**, כדי שהמאבקים ישלימו את תהליך הבשלתם עוד לפני שהשמש חוזרת ומחממת אותם יתר על המידה במהלך היום. להערכתי, בשני הפרחים הללו עוזרים עלי הכותרת למאבקים להתקרר ע"י **פליטה מוגברת** של קרני אור נראים ובלתי נראים. תהליך זה דומה בעיקרו לשידור מוגבר מאנטנת צלחת, על פי עקרון ההיפוך באופטיקה, עליו עמדנו

לעיל. הרעיון הוא שאם ניתן להגביר את הקליטה של אנרגית אור על המאבקים, באמצעות החזרת גלי האור מהצלחת, הרי שבתהליך הפוך ניתן להגביר את פליטת אנרגית האור מהמאבקים באמצעות אותה צלחת. כלל ידוע באנטנות הוא שאותה אנטנה יכולה לשמש הן לקליטה והן לשידור. כאן לפנינו, בפרחים הנידונים, רואים כיצד מנוצלים עקרונות השידור מצלחת על ידי הפרחים. דוגמאות יוצאות דופן אלו מחזקות את גישתי הפיסיקלית כי הפרחים מנצלים את כל השיטות האופטיות הידועות לנו כדי להביא לויסות חום וקור באזורי אברי המין של הצמח. לא מן הנמנע כי גם הקרקפות הכדוריות הסגולות של הקוצים משדרות, כרשתות, קרינה סגולה - אנרגטית מאד - כדי להביא לצינון המאבקים והשחלות בימות החום. רשתות קרקפתיות אלו עוזרות לצינון הפרח גם באמצעות הרוח העוברת בתוכן, כמו ברדיאטור, וגם באמצעים אופטיים ע"י שידור קרניים אנרגטיות. הקיפודן המצוי הוא אחת הדוגמאות הבולטות. בחודשי הקיץ בהרים הגבוהים, כדוגמת הרי הגליל העליון והחרמון, נפוצות מאד הקרקפות הכחולות סגולות של פרח זה. הקרינה הסגולה והאולטרה-סגולה שם חזקה והצמח יודע כיצד לצנן את עצמו ע"י פליטה מוגברת של צבעים אנרגטיים אלה. זוכרני כי לפני שנים, בתחילת מחקרי את הפרחים, מדדתי בתוך אחד מפרחי הקוצים הללו, כנראה גדילן מצוי, טמפרטורה הנמוכה בלפחות מעלה אחת מהטמפרטורה הסביבתית.

ט) **צבעי האבקנים.** כאמור, על פי הגישה הפיסיקלית, אני משער שהצמחים יכולים עקרונית להגביר את הגלים בכל אורכי הגל ולהפוך אותם לאנרגיה הניתנת לניצול למטרות כימיות. המאבקים קולטים אורכי גל מסוימים, מהשמש עצמה, מהשמים, מעלי הכותרת ומעצמים שבסביבה (מסלעים ברקפת?), מנצלים את אורכי הגל הדרושים להם, לשם התחממות או לתהליכים ביוכימיים, ומחזירים את אורכי הגל שאינם מנוצלים. זה מסביר למשל מדוע יש צבעים מסוימים למאבקים מסוימים. זאת עשויה להיות אחת הסיבות לכך כי בפרחים רבים ניתן למצוא קורלציה מסוימת בין צבע המאבקים וצבע עלי הכותרת בצד הפונה למאבקים. סיבה נוספת עשויה להיות קשורה למה שהוסבר לעיל בקשר לצבעוני בעל ששה עלי כותרת הנסגר בלילה ויוצר תא מבודד קטן שבתוכו מצויים המאבקים. המאבקים החמים פולטים לתוך התא הקטן כמויות חום בתהליכי קרינה והסעה. בדומה למבנה של טרמוס, קירות התא מצופים מבפנים בחומרים המחזירים קרינה התואמת אולי את אורכי הגל המוקרנים מהמאבקים. אורכי גל אלה הם אולי אותם אורכי גל אשר נבלעו ע"י המאבקים במשך היום אך לא נצרכו לתהליכים הכימיים ביולוגיים של המאבקים. נשים לב שהמאבקים של פרחים רבים הם בעלי צבע צהוב או שילובים של צהוב עם צבעי יסוד אחרים. על הסיבות לכך עמדנו בפרק א' בהקשר לתכונות הפיסיקליות של הצבע הצהוב.

לזירי האבקנים עשויה להיות חשיבות פיסיקלית ממדרגה ראשונה. לא רק שהם משמשים כעמודים הנושאים את המאבקים ומכוונים אותם לכיוונים הרצויים, אלא שלא מן הנמנע שהם משמשים גם כמובילי גלים, בדומה למה שקורה בסיבים אופטיים בתקשורת. רמז ברור לתכונה כזאת ניתן למצוא למשל בזירי הארוכים של הצלף הקוצני (ראו תמונה מס' ...). רמז נוסף ניתן לראות בפרחי הבוצין המפורץ (ראו תמונה מס' ...). במין זה מתקבל אצלי הרושם שקיים שילוב של דיפולים והולכת גלים. הזירים במין זה מכוסים בשערות סגולות קצרות וזקופות לכל אורך הזיר. לא מן הנמנע כי השערות הללו קולטות אורכי גל שמעל הסגול ופולטות את הסגול והאולטרה-סגול האנרגטיים. בכך הן תורמות לצינון הזירים בימי הקיץ החמים בהם פורח הבוצין המפורץ. יתכן גם שאת אורכי הגלים הנותרים מעבירות השערות אל תוך הזיר ושם הם מובלים ע"י החזרות מרובות, בדומה לשיטת הסיבים האופטיים, אל המאבקים ו/או אל תחתית הזיר. חלק מהאור בוקע החוצה ובכך מתקבל הצבע הכתום של הזיר. השערות סגולות והזיר כתום. כלומר יש עליה באורכי הגל, בין מה שנקלט בשערות לבין מה שמובל בזירים. כמו כן נוכחים בהבדלים בין שיטת איסוף הגלים והולכתם אצל הבוצין המפורץ לצלף הקוצני. אצל האחרון הצבע הסגול הולך ומתמעט ככל שיורדים לאורך הזיר לכיוון מטה. אך אצל הבוצין המפורץ יש קליטת קרינה, באמצעות השערות/דיפולים, לאורך כל הציר והצבע באותה עוצמה לכל אורך הציר. אציין

עוד כי תופעת הנפילה של כל עלי הכותרת הצהובים של הבוצין המפורץ, בעקבות נגיעה בהם, נובעת, להערכתך, מכך שהחיבור של הפרח לגבעול קצר מאד, ניתן לאמר אפילו שאין לו גבעול. לכן אין מרחב תמרון לתנועה של הגבעול, ביחד עם הפרח, כאשר נוגעים בו. פרח קייצי זה אינו עוקב שמש ולכן אין לו צורך בגבעול ארוך. הנפילה היא, לכן, מסיבות מכניות גרידא ולא מהסיבות (חברתיות) האחרות המוזכרות בספרות.

(י) **תכונות הצוף.** תפקודי הצוף יכולים להיות מגוונים. הצוף הוא בעל קיבול חום גבוה והוא עשוי לעזור בוויסות הטמפרטורה של הפרח כולו ושל אזור השחלה בפרט. מה שברור לי כפיסיקאי הוא כי לא הגיוני להניח שהפרח יצר את הצוף במיוחד עבור החרקים. התכונות הפיסיקליות של הצוף מתקבלות בין היתר בזכות המרכיבים האתריים שבו. אתרים אלה נדיפים ובכך מתאפשר קרור אברי המין בפרח כאשר הטמפרטורה בחוץ גבוהה מדי. מצד שני, בגלל קיבול החום הגבוה של הצוף הוא שומר בלילה על טמפרטורה גבוהה מהסביבה של הפרח ובכך הוא תורם לשמירה על טווח טמפרטורות רצוי עבור אברי המין בפרח. לחומרים אתריים נדיפים יש ריחות חזקים מיוחדים. מכאן, כנראה, המשיכה הגדולה של החרקים אל הצוף. מכאן מובן מדוע התערבות החרקים בחיי הפרח היא תופעה משנית.

#### 4.1) **תוצאות מחקרים מדעיים**

עד עתה הצבעתי על התרשמותי כפיסיקאי ממה שראו עיני ומהבדיקות הפשוטות יחסית שיכולתי לבצע ללא תקציבי מחקר. עשיתי זאת כחובב טבע ומתוך רצון לנסות להבין כיצד החי והצומח מתיחסים לתופעות פיסיקליות המוכרות לי. בעיקר מענינת אותי השאלה מהי ההתייחסות של החי והצומח לזמן ולמרחב. זה נושא רחב מאד ואדון בו במסגרת כוללת יותר. כאן ברצוני לציין מספר מאמרים מדעיים בספרות הביולוגית המקצועית בהם נתקלתי לאחרונה, לרגל כתיבת חוברת זאת, מהם ניתן לקבל חיזוק רב לגישה הפיסיקלית החדשה שהוצגה לעיל.

בשנים האחרונות נעשו לא מעט מחקרים מעמיקים על מספר סוגים של פרחים באזורים קוטביים/אלפיניים, כולל בהרים גבוהים ומושלגים בארה"ב. (ראו למשל [23] עד [27]). המטרה של המחקרים היתה לברר האם פרחים באזורים הקרים פיתחו מנגנון פיתוי לחרקים ע"י יצירת מקום חם עבור החרקים בתוך הפרח באמצעות **עקיבת-שמש**. על התופעה של עקיבת-שמש (HELIO TROPISM) בפרחים עמדו כבר לפני שנים רבות. דווח עליה במשפחות **המרוכבים, הפרגיים, הנוריתיים והורדיים**. גם דרווין בזמנו דיווח על התופעה. במאמר של טוטלנד (TOTKAND) מ-1996, [23], נבדקה עקיבת-שמש בפרחים אלפיניים בנורבגיה המזכירים לפי תאורם את **נורית ירושלים** שלנו. היות ולא מצאתי שנתנו שם עברי לפרח זה אקרא לו כאן **נורית אקריס-ל**. (*Ranunculus acris L.*). זה פרח צלחת בעל 5 עלי כותרת מבריקים בחלקם העליון. (התוספת של האות "ל" לשם הפרח חשובה כאן. ראיתי תמונה של זן של נורית אקריס מתורבתת עם הרבה יותר עלי כותרת). במאמר מדווח על השפעת עקיבת-שמש בפרחים אלה על טמפרטורת הפרח, ביקורי חרקים ויצור זרעים. במהלך המחקר נקשרו חלק מהפרחים כך שלא יוכלו לעקוב אחר השמש. מהמחקר התברר כי בפרחים שלא נקשרו העקיבה אחרי השמש היתה משמעותית ביותר בשעות הצהריים. הסטיה הזויתית, בין כיוון צלחת הפרח לכיוון השמש, היתה מינימלית ב-13:00- בצהריים, 16- מעלות בלבד, לעומת סטיות של 33- מעלות ב-09:00- בבוקר, שעתיים וחצי אחרי זריחה, ו-48- מעלות ב-19:00-, כשעה וחצי לפני שקיעה. הטמפרטורות בתוך הפרחים שעקבו אחרי השמש היו כמעט תמיד מעל 1 מעלה ביחס לטמפרטורה שמחוץ לפרח והגיעו גם להפרש של 3.5 מעלות כאשר הסטיה הזויתית היתה מינימלית. במאמרים אחרים, המצוטטים ב-[24], מדווחים על הפרשים גבוהים יותר, עד 10 מעלות, תלוי בסוגי הפרחים ובתנאים האחרים. במאמר של **הררה** (Herrera) מ-1995, [25], מראים שעליית הטמפרטורה הגבוהה ביותר בתוך פרח מסוג אחר, ממשפחת הנרקיסים (לאו דוקא עוקב-שמש), היא באזור **המאבקים**.

עוד מדווח במאמר של טוטלנד [23] כי בניגוד למאמרים קודמים, **החרקים אינם מושפעים מעקיבת-שמש בפרחים**. לא היתה אינדיקציה שהחרקים מבחינים בין הפרחים על פי מידת הסטייה הזוויתית שלהם מהשמש. החרקים גם לא שהו יותר זמן בפרחים שהיו מכוונים יותר כלפי השמש. לעומת זאת מוצאים קשר הדוק בין עקיבת-שמש בפרחים לבין זרוז תהליכי יצור הזרעים. טוטלנד מדווח כי תנועת פרח עוקב-שמש נפסקה כאשר הפרח היה בצל. גם אני הבחנתי לא אחת בתופעה זאת. אפשר למשל להשוות בארץ בין כיווני פרחים עוקבי שמש (**חרציות** למשל) באזור מוצל בין בתים, לבין אלו באזור מואר בשעת צהריים. טוטלנד מדווח גם כי עקיבת-שמש יורדת ככל שהפרח מתבגר ומגיע שלב האבקה (male stage) והיא נעצרת לחלוטין כאשר הצמחים מתחילים לתת פרי. על החשיבות הרבה של החזרת קרני אור מעלי הכותרת ועקיבת-שמש למטרת יצור הזרעים, הן בכמות והן במסה, ניתן לראות למשל בדיווח של **קורבט** (Corbett) ושותפיו [27]. הם ביצעו את מחקרם על פרח עוקב-שמש ממשפחת הפרגיים, **פרג הקוטב** (Arctic poppy) (*Papaver Radicatum*). במהלך המחקר הם בדקו קבוצות של פרגי קוטב עם עלי כותרת לעומת כאלו שעלי הכותרת שלהם נפלו או הוסרו באופן מלאכותי. **התברר כי קרני השמש מוחזרות בצורה מרוכזת מעלי הכותרת אל השחלה של הפרג. עקב כך, טמפרטורת השחלה עולה מעל הטמפרטורה של הסביבה הסמוכה שמחוץ לפרח.** עוד מדווח במאמר כי **פרג זה אינו תלוי כלל בהאבקת חרקים**. הפרגים פיתחו 100% של סט הזרעים ללא תלות בכך אם היה ביקור של חרקים אם לאו. זה מצביע על כך שהגברת הטמפרטורה והקרנה עשויים להיות יותר מועילים להתפתחות הזרעים מאשר ביקור החרקים, כפי שמודגש במאמר של קורבט ושותפיו. אציין בסוגריים כי גם באביב הישראלי, החם יחסית לאזורי האלפיניים, יש תופעות של עקיבת-שמש בפרחי צלחת רבים, כולל בפרחי הפרג כפי שדיווחתי לעיל מבדיקותי. אצלנו בישראל אין לחרקים יתרון בכניסה דווקא לפרח עוקב-שמש בעל טמפרטורה גבוהה יותר. חם להם גם ללא הפרחים. להיפך, כאן הם מחפשים מקומות קרים יותר, כפי שנוכחים למשל מהתנהגות זבובים הנכנסים לבתים בימות החום. לכן, אותי בישראל לא צריך לשכנע כי עקיבת-שמש בפרחים לא נועדה למשיכת חרקים, אלא למטרות של זרוז הבשלת המאבקים והביציות.

מאמר מעניין נוסף הוא מאמרם של **סטנטון** (Stanton) ו**גלן** (Galen) 1993- [26] בנושא: "אור כחול שולט על עקיבת-שמש ע"י פרחים של צמחים אלפיניים". במחקרם הם בחנו את ההבדלים בהשפעות של אור כחול ואולטרה-סגול, לעומת אדום ואינפרא-אדום, על פרחי **נורית השלג** (Snow buttercup) (*Ranunculus adoneus*) בקיץ בגובה 3650 מ' בהרי פנטילבניה המושלגים בקולורדו, ארה"ב. אלו פרחים דמויי צלחת עם עלי כותרת צהובים מבריקים. כדי לבחון את התופעה הם שמו מעל הפרחים בשדה קופסאות עם צלופנים כחולים ו/או אדומים, בצדדים שונים של כל קופסה, ובחנו את מידת עקיבת-שמש של הפרחים המצויים בתוך קופסאות אלו. המחקר אישר תופעה שנצפתה בעקיבת-שמש של עלים. דהיינו שהאור הכחול הוא זה שאחראי לעקיבת-שמש. אזכיר כאן את מה שהוסבר לעיל, כי אורכי גל של אור כחול ואולטרה-סגול אנרגטיים יותר מאשר אורכי גל של אור אדום ואינפרא-אדום. לכן, תוצאות המחקר של סטנטון וגלן מאשרות שהפרחים יודעים לנצל את היתרונות הפיסיקליים של האור.

דומני שניתן לאמר כי סדרת מחקרים אלה, ועוד רבים המוזכרים בהם, מאשרים את הגישה הפיסיקלית הנדונה בספר זה, לפחות בכל מה שנוגע להגברת אנרגית אור על ידי ריכוזו באמצעות עלי הכותרת של הפרחים, לצרכים של הפרח עצמו, ללא תלות בחרקים. יש תופעות פיסיקליות נוספות עליהן עמדתי בספר אשר עדיין לא נתקלתי במחקרים שבדקו אותן. אקווה שבעקבות ספר זה יורחבו המחקרים וניתן יהיה לברר כמה מההסברים הפיסיקליים שלי, המסתמכים על תצפיות אישיות. גם אם יתברר כי הסבר פיסיקלי כלשהו אינו מדויק די הצורך, מומלץ לחפש הסבר פיסיקלי אחר. מנסיוני נוכחתי כי דבקות בגישה הפיסיקלית מביאה למציאת הסברים מעניינים ומפתיעים אשר חלקם כבר הוכחו כנכונים ע"י הניסויים המדעיים המעמיקים בשטח המדווחים בסדרת המאמרים הנ"ל.

## 5.ב סיכום לפרק הפרחים

כאשר הצצתי לראשונה לתוך לועו של **איריס הארגמן** בגבעת האיריסיים שליד נס ציונה, לפני למעלה מ-15 שנים, נגלה לי עולם חדש. העולם שבו שולטים חוקי הפיסיקה לא רק על גופים דוממים אלא גם על המבנה והצבעים של הצומח והחי. לכל פרח יש מבנה, צורה וצבעים התואמים את צרכיו שלו באותו רגע. ככל שהמבנה יותר מסובך כך הצבעוניות



בפרח מגוונת יותר. כיום אני מבין כי האיריסיס מגינים על המאבקים והשחלה בפני קרני שמש באורכי גל לא רצויים, מגבירים פנימה אורכי גל רצויים ומגינים על טמפרטורת המאבקים באמצעות שערות באזורים הדרושים, כאשר הפרח סגור. באזור הכיפופים והשערות באיריסיס יש צבעוניות הנדסית מוגדרת המצביעה על התפקודים המיוחדים של החלקים השונים בפרח. נוכחנו כי גם צמחים אחרים, ובעלי חיים, משתמשים בשיטות פיסיקליות מתוחכמות מאד (עבור האנושות) לצרכים התפקודיים שלהם בכל רגע ורגע, כאשר הצבעים מבטאים בעקיפין את התפקודים השונים של כל חלק בחי ובצומח. אני קורא לכל חובב טבע ליטול חלק במציאת הסברים פיסיקליים למבנה ולצבעים של צמחים ובעלי חיים (מובן מבלי לקטוף או לפגוע בהם). הבנתם תאפשר הבנה עמוקה יותר של הטבע.

### 6.ב. דף עבודה לחקירת צבעי פרחים

לפניכם דף עבודה לבדיקת הקשרים בין הצבעים בפרח, בו תבחרו, לבין סל המזונות שלו. נסו לענות על השאלות בהתאם למוסבר בחוברת, באנציקלופדיות ומדריכי פרחים שונים וכן על פי תצפיותיכם בתמונות, בחנויות פרחים (אמיתיים, למרות שיש כיום גם חיקויים מפלסטיק מאד מוצלחים), במשתלות, בתערוכות, בסרטי וידאו, באינטרנט ובעיקר בטבע. בתצפיותיכם בטבע השתדלו לעקוב אחרי התנהגותו של הפרח במצביו השונים. רצוי מאד - מבלי לקטוף אותו כדי שלא לפגוע באיזון הטבעי. בקביעת הצבעים תוכלו להעזר בטבלאות הצבעים בסוף הספר. כמו כן תוכלו להעזר בטבלה 2 הנותנת את המפתח (שלי) לקשר בין הצבעים והתכונות הפיסיקליות.

שם הפרח שנבחר: .....

שייך למשפחה: ..... סוג: ..... מין: .....

אזור התצפית בטבע: .....

עונת התצפית: .....

שעות התצפית: .....

מידת העננות: .....

מזג האויר בשעת התצפית: .....

תאור הפרח על פי התרשמותכם בשטח: .....

.....

מודול צורת הפרח (ראו ב-5] עמ' טז'-יח'): .....

מודול צורת חיים של הצמח (ראו ב-5] עמ' יט'): .....

מצב איזון הפרח (אנכי, אופקי, כלפי מטה, אחר?): .....

האם הפרח עוקב- שמש על פי תצפיותיכם במשך מספר שעות: .....

אם הפרח אינו עוקב-שמש, האם יש לכלל הפרחים מסוגו כיוון מוגדר. אם כן מהו הכיוון: .....

מס' עלי כותרת: .....

צבעי עלי הכותרת (תארו מיקום כל צבע): .....

צורות עלי הכותרת: .....

שיטת הסגירה של עלי הכותרת בלילה (ראו בספר): .....

נסו לדמיין את מהלכה של קרן שמש המגיעה אל הפרח ומוחזרת מעלי הכותרת פעם אחת או יותר. האם הקרן החוזרת תגיע לבסוף אל המאבקים: ..... האם היא תגיע לבסוף אל השחלה: .....

האם קרניים בצבע מסוים מוסתרות ע"י עלי הכותרת מהמאבקים. אם כן מהו צבע הקרניים (תוכלו לקבוע זאת על פי מעבר הצבע דרך עלה הכותרת): .....

האם קרניים בצבע מסוים מסוננות ע"י עלי הכותרת בדרכם אל המאבקים. אם כן מהו צבע הקרניים (תוכלו לקבוע זאת על פי מעבר הצבע דרך עלה הכותרת): .....

מספר האבקים: ..... מספר המאבקים: .....  
האם מספר המאבקים הוא כפולה שלמה של מספר עלי הכותרת: .....  
כיווני המאבקים: .....  
צבעי המאבקים: .....  
מהו הקשר בין צבעי המאבקים וצבעי עלי הכותרת (צבע דומה, משלים, אחר) (ראו הסבר בספר): .....

האם לעלי הכותרת יש תפקודים בהכשרת המאבקים והשחלה: .....  
אם כן מנו את התפקודים שגיליתם: .....

האם יש תפקודים דומים גם בפרחים אחרים שבדקתם: .....  
אם כן באלו פרחים ומהם התפקודים: .....

האם יש קשרים בין הקרינות המגיעות אל הפרח ובין הצבעים של חלקיו השונים. אם כן מהם הקשרים: .....

הערות נוספות: .....  
.....  
.....

## פרק ג. סודם הפיסיקלי של הצבעים בבעלי חיים

בפרק זה ננסה לחשוף את סודם הפיסיקלי של הצבעים בבעלי חיים. נדון בדוגמאות של עופות, פרפרים, חרקים אחרים, דגים ויונקים בהם ניתן לקשר בין הצבע המיוחד של חלק מסוים לבין תפקוד מוגדר של אותו חלק. בקריאת הפרק מומלץ להעזר במדריכים שונים אשר חלקם מובאים בביבליוגרפיה. כמו כן מומלץ להתבונן בחנויות בעלי חיים, גני חיות, מוזיאוני טבע, סרטי וידאו בנושאי טבע, כולל הסרטים המצוינים בערוצי המדע בטלוויזיה, באינטרנט וכמובן בטבע עצמו. מנסיוני, המעקב אחר התנהגות בעלי החיים בטבע מבהיר דברים שלעיתים לא ניתן לגלותם בדרכים האחרות. חשוב להבהיר כי רצוי להמנע ככל האפשר מלהפריע לפעילות הטבעית של בעלי החיים ולא לצוד אותם, אלא באישור הגורמים המוסמכים. כל הפרעה והתערבות מיותרת עלולה להפר את האיזון העדין בטבע.

### 1.ג) "העין" בזנב הטווס

דוגמא מאלפת למשמעות הפיסיקלית של הצבעים בבעל חיים ניתן לראות "בעין" הצבעונית בנוצת זנבו של הטווס ההודי (*Pavo cristatus*) ( הנקראת כאן בקיצור "עין הטווס"). הדעה המקובלת היא שהזנב היפה פותח במהלך האבולוציה כדי לשמש לטווס אמצעי חיזור יעיל אחרי הטווסה. על פי הגישה הפיסיקלית החדשה, ההסבר המעמיק יותר נעוץ בסיבות פיסיקליות. בגלל חשיבות הדוגמא הקדשתי לחקירת הנושא זמן רב ויש לי חומר רב בנידון. מאמר מדעי שלי בנושא נמצא בהכנה [28]. כאן אביא הסבר מקוצר. כאמור, נקודת המוצא שלנו הוא סל מזונותיו של הטווס. מתברר שהטווס ההודי חי במקור ביערות הג'ונגלים הטרופיים של הודו וצילון, לפני שהשמידו את מרית היערות שם. תפריטו העיקרי של הטווס היו ככל הנראה אפייטיים אקזוטיים, כגון מיני שחלבים. האפייטיים הם צמחים הגדלים על הענפים הגבוהים של עצי הג'ונגל הסבוך לא כטפילים אלא כמצע גידול. ( ראו ערך אפייט ב-3 ] ). שם בצמרות הג'ונגל הטרופי יש די שמש ולחות המאפשרים למגוון גדול של אפייטיים לצמוח. כפי שדיווחו ראשוני החוקרים, הטווס הזכר היה מטפס אל ראשי העצים לקראת ערב ומבלה את כל הלילה על מרומי העצים, למרות הרוחות החזקות והגשמים ( ראו למשל עמ' 190-192 אצל Baker [4] ). מכאן ניתן לשער כי בבוקר נהנה הטווס ממזון מגוון ומיוחד הכולל לא רק אפייטיים אלא גם בעלי חיים קטנים

הניזונים על אותם ענפים גבוהים. לעת צהריים היה הטווס יורד אל בת זוגתו שנשארה על הקרקע, או בסמוך אליה, לטיפול במשפחה ומעביר אליה חלק מהמזונות שליקט ועיכל. זאת יכולה להיות אחת הסיבות מדוע הטווס גדול מהטווסה. בין היתר, בעת הירידה היה עליו להשמיע קריאות כיוון רמות כדי לתקשר עם הטווסה. מכאן הקריאה הצורמת המוכרת שלו הנשמעת למרחקים גדולים. הטווס ההודי הוא ממשפחת הפסיונים בסדרת התרנגולאים. יש לו רגליים לא קצרות ומשקלו יכול להגיע גם ל-5 ק"ג. לטווסה יש זנב קצר ולטווס זנב ארוך בנוסף על הזנב הקצר. להערכתך, מטרת הזנב הארוך היא לשמור על שיווי משקלו של הטווס בעת היותו על הענפים העליונים של עצי הג'ונגל. אם לא היה לו זנב מספיק ארוך היה מרכז הכובד שלו, בשעה שהוא עומד על הענף, מצוי בגובה ביטנו בערך, דהיינו עשרות ס"מ מעל הענף. במקרה כזה, כל רוח קלה היתה עשויה לגרום למומנט ( כח\*מרחק ) גדול ולהפיל אותו מהענף. זנב ארוך היורד כלפי מטה אל מתחת לענף מוריד את מרכז הכובד של הטווס אל נקודה ( דמיונית ) על הענף עצמו. עקרון האיזון כאן דומה לעקרון הפועל במאזניים, כאשר בצד הארוך ניתן לשים משקל קטן ובצד הקצר משקל גדול ועדיין לאזן אותו. גם עופות אחרים משתמשים בזנב כמיצב את הגוף ומוריד את נקודת מרכז הכובד. ניתן למשל לראות זאת בשרקרק גמדי ( עמ' 73 ב-31ן ) כאשר הוא עומד על חוט אופקי וזנבו מוטה חזק כלפי מטה. אני מעריך שהצורך בהורדת מרכז הכובד הוא הסיבה העיקרית לזנבות הארוכים של פסיונים רבים ההחיים על ענפי עצים בג'ונגל. יש גם צורך בפריסה מבוקרת של הזנב כדי ששטח התנגדות הזנב לרוח ישווה לשטח התנגדות גוף הטווס בכיוונים השונים. במצב כזה יכול הטווס לישון במשך שעות מבלי שרוח קלה תפיל אותו. עד כאן אנו מבינים סוף סוף לשם מה זקוק הטווס לזנב ארוך וקל הניתן לפריסה ע"י נוצות זנב באורכים שונים. אך מה נותנות לטווס העיניים היפות על זנבו .

בתמונה מס' ... אנו מביאים צילום של "עין הטווס" בכף של נוצת טווס. בתמונה הצבעים שונים במקצת מאשר במציאות. במציאות יש במרכז כף הנוצה צבע כחול כהה. מסביבו צבע ירוק עז מבריק, וסביב הירוק יש כתם גדול אליפטי של חום בהיר. בהמשך יש טבעות צבע נוספות אך לא נדון בהן כאן. השוואת הצבעים הללו עם התכונות הפיסיקליות שבטבלה 2 מרמזת על תפקודים יחודיים לכל אזור צבוע בהתאם לצבעיו. נסתכל על התכונות המכניות של כל צבע. לכחול כהה יש גמישות לפיתול וחוזק למתיחה. לירוק יש גמישות לפיתול וחוזק לחיתוך. לחום יש מידות מופחתות של חוזק למתיחה וגמישיות לכיפוף ולפיתול. את המשמעויות המעשיות של תכונות אלו, באזור זה של נוצת הטווס, נוכל להבין אם נקח בידינו נוצה אמיתית מזנב טווס, אשר ניתן להשיגה לעיתים בחנויות פרחים, וננשוף לעבר "עין הטווס" שבכף הנוצה בעוצמות שונות. ניווכח כי בנשיפה קלה מתפרדים הקצוות הקיצוניים של כף הנוצה. כאשר נגביר במקצת את הנשיפה יפרדו חלקי הכף באיזור החום. הגברה נוספת של הנשיפה תפריד במקצת את הנוציות באזור הירוק. נשיפה חזקה מאד תפרוץ בבת אחת גם את הכתם הכחול כהה. אנו נוכחים אם כן שהצבעים השונים בעין הטווס מצביעים על אזורים הנפרצים בעוצמות רוח שונות. נחזור עתה אל הטווס העומד בלילה על ענף ברזומו של עץ גבוה כאשר זנבו מוטה כלפי מטה לצורך איזון. אם כף נוצת הזנב היתה רציפה ובלתי ניתנת להפרדה, כמו למשל משטח ניר, כל רוח מעבר לעוצמה מסוימת היתה דוחפת את הזנב כולו והיה נוצר מומנט חזק שהיה מגלגל ומפיל את הטווס מהענף. אולם אם הכף ניתנת להפתח בהתאם לעוצמת הרוח, כך שהמומנט של הזנב מתקטן במידה הדרושה ליצוב כל הטווס, אזי יש לנו פתרון מצויין לבעיית הבעיות של הטווס, דהיינו איך להשאר כל הלילה על הענפים העליונים בג'ונגל הטרופי, למרות הרוחות המשתנות באופן פתאומי בגלל ריבוי העצים, מבלי לאבד את שיווי המשקל. כאן מתגלה לנו לראשונה תפקודה של נוצת זנב הטווס כמכשיר יצוב עדין היכול לתפקד בעוצמות רוח שונות עם שינויים דרסטיים. הצבעים מרמזים על חוזק הסגירה ( כמו ריץ-רץ ) בין הנוציות של כף הזנב. מיותר לציין כי האנושות עדיין לא הגיעה לדרגת תיחכום כזאת של מכשיר יצוב נגד רוח. במאמר שהכינותי על הנושא, ושעדיין לא פורסם, אני מצביע על הקשר בין הצבעים השונים לבין סוגי הזיזים המאפשרים את סגירות הריץ' רץ בזנב הטווס. ערכתי גם תצפיות דרך המיקרוסקופ ואכן יש הבדלים מדהימים בין הזיזים השיכים לצבעים השונים. יש ספרות מדעית שלמה במדע האורניתולוגיה ( חקר העופות ) שבה דנים לא מעט על הקשר בין צבעי הנוצות, כולל אלו של הטווס, לבין מבני הנוציות והזיזים בכל אזור צבע. אפילו בבדיקה פשוטה בבית, בעזרת זכוכית מגדלת, ניתן להיווכח בהבדלי הצפיפויות של זיזי הנוציות באזורי הצבעים השונים. באזור הסגול הצפיפות גדולה בהרבה מאשר באזור החום. בהתבוננות דרך מיקרוסקופ, בהגדלות של 100 10000-, ניתן להבחין בהבדלים גדולים במבנה הזיזים של הנוציות באזורי הצבע השונים. די במציאת הבדלים אלה כדי לערער את הדעה המקובלת האומרת שמטרת הצבעים המרהיבים ב"עין הטווס" היא למשוך את תשומת

לבה של הטווסה. אם זאת אכן היתה המטרה, היה זול ופשוט יותר עבור הטבע ליצור זיזים אחידים לכל אורך הנוציה ולצבוע את האזורים הרצויים בחומרים צבעוניים שונים. ממחקרים מעמיקים יותר המדווחים בספרות ידוע כי את הצבעים המרהיבים אצל הטווס ההודי יוצרים מבנים מיקרוסקופיים רב שכבתיים של גלילים מוארכים מוצקים המכילים את החומר מלנין. יש 4 עד 11 שכבות זו מעל זו כך שמתקבל שריג תלת-ממדי של מלנין וקרטיין. האור מוחזר מהמרווחים שבין השכבות ומתקבלת תופעת התאבכות הנותנת צבע מוגדר. הצבע המסוים תלוי במרווחים ובזוויות שבהן האור חודר ויוצא מהשריג (ראו למשל עמ' Lucas409 [30]). כלומר מדובר בצבעי מבנה הנוצרים כתוצאה מסידור מוגדר של חומר ביניים והחזרות אור בזוויות מתאימות. הדבר מזכיר את הצבעים המתקבלי בהתבוננות בזוויות שונות על יהלום, שהוא שריג גבישי של אטומי פחמן. על צבעי מבנה בנוצות איני מחדש דבר. החידוש שלי הוא בקישור בין התפקוד המכני של "עין הטווס" לבין צורכי האיזון של הטווס בתנאים קיצוניים. ככל ששכבות המלנין יותר צפופות כן עולה מידת הקשיחות של הנוציות ודרושים כוחות גדולים יותר להפריד בין הזיזים. מכאן ניתן להבין את הקשר בין עוצמת הרוח לבין מידת ההפרדה של הריץ-רץ' בנוציות, כדרוש ליצוב הנכון של הטווס על ענף גבוה. אם יש בידיכם נוצת טווס תוכלו להפריד בעזרת האצבעות בין הנוציות ולחוש את ההבדלים בעוצמות הריץ-רץ' בצבעים השונים. על תכונות מופלאות נוספות של הטווס אפרט בהזדמנות אחרת.

ראינו בדוגמא זאת כיצד ניתן להשתמש בשיטה הפיסיקלית החדשה כדי להבין את המבנה והצבעים של בעלי החיים והצמחים: התחלנו מסל המזונות של הטווס. זיהינו את המכשולים העומדים בפניו להשגת המזונות. נוכחנו כיצד מותאם הזנב להתגברות על המכשולים. ראינו כיצד מורכבים חלקי הזנב כדי שימלאו את תפקודיהם. לבסוף קישרנו בין המבנה והחומרים לבין הצבעים של "עין הטווס".

## 2.ג) עופות

כאשר לוקחים ביד את מגדיר הציפורים של היינצל [2] ועוברים על המשפחות השונות של ממלכת העופות, קשה להתעלם מהצבעוניות המיוחדת המאפיינת כל משפחה. כמו כן מודגשים ההבדלים בין צבעי הציפורים בעונות ובגילים השונים. הקשרים בין הצבעים והתפקודים הפיסיקליים של החלקים השונים, עליהם דיברנו בפרק א', בולטים מאד בעופות. מהדיון כאן על "עין הטווס" ניתן להשליך תכונות רבות לגבי כל ממלכת העופות.

בכנף ציפור, האמורה לעמוד בתנאי תעופה ותמרון מוגדרים באויר בעל צפיפות מסוימת ( בגובה מסוים ), רואים לעיתים רבות צבע מיוחד בשפת ההתקפה של הכנף ( בחלק הקדמי ), צבע אחר בגב הכנף וצבע שלישי בשפת הזרימה של הכנף ( החלק האחורי ). מי שמתמצא במטוסים לא יתקשה להגדיר את התפקודים השונים של חלקי כנף שונים במינים רבים של ציפורים ולהתאים אותם לתנאי התעופה המיוחדים של כל ציפור. על ההתאמה בצורת הכנפיים לתנאי התעופה של ציפורים ידוע מזה זמן רב. התוספת שלי נוגעת לקשרים בין חלקי הכנף לבין תפקודיהם, כאשר הצבעים המיוחדים עשויים לעזור לנו במציאת הקשרים.

ניתן לעשות השוואה בין צורות עופות שונים לבין מטוסים בעלי יעודים שונים. למשל החסידה הלבנה דואה ונראית כדאון ( תמונה מס' ... ). לעופות טורפים מהירים יש כנפיים משוכות לאחור כמו למטוסי קרב. (ראו למשל בזים בעמ' 93 ב-2). דוגמאות אלו אינן חדשות. אולם כאשר בוחנים את מבנה הכנף של ציפור כלשהי על פי צבעי החלקים השונים באותה כנף נוכחים כי לחלקים אלו תפקודים אירודינמיים מיוחדים התואמים להפליא את תפקודי החלקים השונים של כנף המטוס המקביל לאותה ציפור. הכנף עצמה בנויה מנוצות. בכל נוצה ניתן להבחין בצבעים שונים של חלקי הנוצה על פי התפקודים הפיסיקליים של כל חלק, כפי שניתן להתרשם מתמונה מס' .... בה מוצגת כנף פרושה של גבתון לבן-גרון בעת תהליך הטבעה. הצבעים האפורים בשפות הקדמיות של הנוצות מצביעים, לפי טבלה 2, על חוזק למתיחה ועמידות בלחץ. אכן, שתי תכונות אלו מאד חיוניות לתפקוד הכנף. אם, למשל, עוברת הציפור, תוך כדי תעופה, ממצב אחד, בלחצים אירודינמיים מסוימים, למצב שני, בלחצים אירודינמיים אחרים, חשוב מאד שהנוצה לא תשנה את צורתה, לא ע"י

התרחבות עקב מתחיה ולא ע"י התקצרות עקב לחץ. כל שינוי בלתי מבוקר בנוצות הציפור יפריע מאד ליכולתה לתמרן את עצמה ע"י שינוי מצב הכנפיים והתאמת קצב הנפנוף לעוצמת הרוח. אם לוקחים נוצה בודדת רואים לעיתים קרובות שוני ניכר בצבעים של חלקיה בהתאם לתפקודי החלקים. הדבר נכון לא רק לגבי תוכים אלא לכל העופות. למשל, אצל בז צעיר שנחת על מרפסת ביתי קל היה להבחין בשוני בכהות הצבע החום של כל נוצה נפרדת. קצה הנוצה היה כהה יותר מהיתר. בהתחשב בסידור הנוצות על כנף הבז ניתן להבין מכאן את הסיבה לפסים החומים כהים על רקע חום בהיר אצל הבז. אברות הקצה אצל עופות רבים שונות בד"כ בצבען מיתר הכנף, כפי שניתן להתרשם גם מתמונתו של בז מצוי בתעופה ( תמונה מס'... ). ראו גם תמונות כנפי הדורסים בתעופה בעמ' 88 ב-89 [2]. לאברות הקצה תפקוד מיוחד בכושר התמרון של העוף בשעת התעופה. גם במטוסים, שינויים קטנים בקצות הכנפיים מאפשרים תמרוני מסובכים. בעניין זה אציין מעקב שעשיתי אחר העורב האפור והעורבני (תמונה מס'...) כדי ללמוד על הסיבות האפשריות להבדלים בין הכנף השחורה, כולה, של העורב האפור לבין כנפו של העורבני, שהיא בעלת הפסים הכחולים בשפת ההתקפה (ראו גם עמ' 305 311-ב [2]). העורבים האפורים מוצאים את מזונם במקומות חשופים ועל הענפים העליונים בראשי העצים. לכן, תעופתם פשוטה יחסית. הצבע השחור נועד לבדוד את פנים הכנף מחם השמש היוקדת. אצל העורבים השחורים החיים במדבריות הצבע השחור מכסה את כל הגוף ( תמונה מס'... ). בניגוד לעורב העפור, מוצא העורבני את מזונו בעיקר בענפים התחתונים של העצים. תעופתו מיוחדת במינה. הוא עף אל מתחת לעץ ונוסק בזווית חדה כלפי מעלה אל אחד הענפים התחתונים. תמרון מסובך כזה דורש פיתולים מיוחדים בנוצות של שפת הכנף הקדמית ומכאן כנראה הפסים הכחולים. כזכור מפרק א', כחול מתקשר אצלי לגמישות לפיתול עם שמירה על בידוד חם.

הזנב בציפורים רבות צבוע בצבע שונה מהגוף, כדבר המתבקש מאליו אם מניחים כי הזנב בעל תפקוד מיוחד המחייב בניה מיוחדת מחומרים מיוחדים אשר מצויים בטבע בצבעים שלהם.

לכל ציפור הרגלי התעופה המיוחדים לה. בהתאם לכך היא נתקלת בהתנגדויות אור מסוימות אותן עליה לזהות תוך כדי המעוף כדי לתפקד נכון. למטוס יש חישנים שונים מחוצה לו, כמו למשל צינור פיסו לבדיקת מהירות יחסית לרוח. לא מן הנמנע כי לציפור משמשות נוצות ופלומות החזה כחישנים עדינים ביותר. זה יכול להסביר למשל מדוע צבע החזה שונה מצבע הגב. אדום החזה הוא דוגמא טובה. הפלומות האדומות מקנות לו תוספת גמישות לכיפוף העשויה להיות חשובה לתפקוד כזה. ניתן להבחין בהבדלי צבעים בין החזה ליתר הגוף במרבית הציפורים. אצל הנחליאלי הצהוב ( ראו תמונה מס'... ) החזה הצהוב מבטא את תכונת האדישות לחם וקור ( ראו טבלה 2 ) מאחר והוא חי במקומות חמים יותר מאשר הנחליאלי הלבן, בעל החזה הלבן, שבית גידולו יכול לכלול גם את הטונדרה הקרה (ראו [2]).

בציפורים רבות המצויות הרבה בשמש צבוע החלק העליון של הראש בצבע שחור. הדבר מרמז לדעתי על הגנה מיוחדת של הקרקפת בפני קרני השמש החזקות, דהיינו יש כאן בידוד חם. אמנם אנו יודעים כי צבע שחור בולע את כל הצבעים ולפיכך היינו מצפים כי דווקא השחור יגרום לחימום הראש. אלא שבנוסף לבליעת הקרניים נותנים חומרים שחורים רבים גם בידוד חם יעיל. כלומר, הקרניים אמנם נבלעות אך החם לא עובר פנימה לשכבות העמוקות יותר. זו למשל הסיבה לכך שתנורי בישול רבים צבועים מבפנים בשחור: כדי שהחם לא יעבור לחלק החיצוני של התנור ומשם יתבזבז לסביבה. זו גם הסיבה מדוע הגחון של מעבורת החלל עשוי מאלפי אריחי קרמיקה חומים שחורים, דהיינו כדי לבדוד את פנים המעבורת בפני החם הלוהט על הגחון בשעה שהמעבורת דואה דרך האטמוספירה, לקראת החזרה ארצה, כאשר גחונה מופנה לכיוון התנועה. הסבר זה יכול להבהיר מדוע ילידי אפריקה הם בעלי עור כהה. כמו כן ברור מכאן מדוע אנו משתזפים, כלומר צבע העור מתכהה, בעת חשיפה מבוקרת לשמש. העור יוצר שכבה עם פיגמנטים כהים ( מלנינים חומים כהים ) העוזרים לו לגונן על פנים הגוף בפני עלית טמפרטורה גדולה מדי בעת החשיפה הבאה לשמש.

לתוכים צבעים מגוונים. תנאי התעופה שלהם שונים מאלו של ציפורים רבות אחרות. הם חיים בעיקר ביערות העבותים ומתמרנים בין הענפים. שם הם מוצאים את פירות היער המיוחדים. חלקי גופם צריכים להיות מותאמים לתנאי התעופה והתנוחות המיוחדות בהם

הם שרויים. עובדה זו מסבירה את מגוון הצבעים הרב אצל התוכים. התבוננות מקרוב על תוכי כלשהוא יכולה להצביע על תפקודו המיוחד של כל חלק. יש תוכים שבכנפיהם מופיעים צבעים ירוקים. דבר זה מצביע אולי על אזורים בעלי חוזק לקריעה וגמישות לפיתול בכנף. הצבעים הנוספים מצביעים על הדרישות הפיסיקליות בהתאם לטבלה 2. בהקשר זה ראוי לשים לב כי התוכי דורה ירוק כמעט כולו. הוא אכן מצוי באזורים פתוחים יותר מאשר יער עבות. לכן אין עליו לבצע מעשי לולינות כדי להגיע למזונו. זאת כנראה הסיבה לקליטתו בארץ ישראל.

המקור אף הוא יוצא דופן בצבעו אצל מרבית העופות. במקרים רבים עליו להיות בעל חוזק למתיחה. לכן במקרים אלה המקור כולו או קצהו הוא בצבע שחור. כאשר דרושה גם תוספת גמישות לכיפוף, בעיקר אצל אוכלי פירות גדולים, המקור צפוי להיות בעל תוספת של צבע ארגמן (ראו טבלה 2). אם דרושה תוספת חוזק לחיתוך נצפה לראות תוספת של צהוב. כאשר התכונה החשובה היא תוספת חוזק לחיתוך נצפה לראות תוספת של תכול (טורקז). בדרך כלל נדרשות למקור מספר תכונות ולכן הצבעים השונים, כולל כתום, אדום וכו'. גודלו וצורתו של המקור מוכתבים בעיקר ע"י סוגי המזון הבאים לקרבו ושימושי המקור כדי להשיגם. אצל תוכי גדול בשם ארא (?) עקבתי בחנות לחיות כיצד הוא מפצח את הקליפות הקשות של סוגי הגרעינים השונים. ההיו שם קליפות שאני לא הייתי מצליח לפצח בעזרת שיני. הארא לוחץ חזק את הגרעין בעזרת הלשון לכיוון החלק העליון הפנימי של המקור. כאשר סוף סוף הגרעין נבקע הוא מרים את רגלו, תופס את הקליפה בין אצבעותיו ושולף מתוכה את תוך הגרעין באמצעות הלשון. טכניקות כאלו דורשות מקורים בעלי גמישות לכיפוף, חוזק למתיחה, חוזק לחיתוך וגמישות לפיתול. אין פלא, לכן, שצבעי המקורים של התוכים כל כך רב גוניים. כל תוכי עם סוגי מזונותיו וצבעי מקורו. לטוקן, למשל, מקור עבה וגדול המותאם לאכילת פירות גדולים. בתמונות רבות של טוקן רואים מקור גדול בצבע כתום כאשר בקצהו כתם שחור (תמונה מס'...). נשאלת השאלה לשם מה הכתם השחור. הרי אין בו תועלת נראית לעין לא בהסוואה ולא באזהרה. התשובה ההגיונית היא שחלק זה כנראה חזק יותר משאר המקור, שכן עליו לחפור בחומרים שונים עד להשגת המזון. כלומר דרוש חוזק למתיחה, דהינו צבע שחור. מעניין לציין עוד כי מקורו של התוכי משמש גם לשם עזרה בהתקדמות בכיוון אנכי על העץ. לכן מקורו של התוכי צריך להיות גם בעל חוזק למתיחה. מכאן התוספות של שחור בצבעים המיוחדים של מקורי התוכים. למשל, מקור אדום של תוכי יכול, לפי טבלה 2, להיות בעל תכונות מכניות של חוזק למתיחה וגמישות לכיפוף. מעניין לראות את מקורו של הבז השחור (תמונה מס'...) והצבע הכתום על המקור השחור, בסביבת נחירי הנשימה. על פי טבלה 2 לכתום יש גמישות לכיפוף, חוזק לחיתוך, התפשטות בחם ושימור חם. ארבעת התכונות הללו חיוניות לבז כאשר הוא מכניס את מקורו לתוך טרף טרי שדמו עדיין חם. ההתפשטות בחם ושימור החום מאפשרים לבז לשמור על פתיחות של נחירי הנשימה בשעה שהמקור מצוי בחילופי טמפרטורות מהירים. כדאי להשוות את מקורו של הבז השחור עם מקורו של הרחם (ראו תמונה מס'...). הרחם, כידוע, אוכל נבלות לאחר שהנשרים הותירו לו משהו. המקור בעיקרו סגול וליד נחירי הנשימה והעיניים יש צבע כתום גדול. על פי התכונות הפיסיקליות של סגול בטבלה 2 דרושות למקור גמישות לכיפוף ולפיתול. לא דרוש כאן חוזק למתיחה כמו אצל המקור השחור. זה הגיוני כשחושבים על כך שמזונו של הרחם יותר רך ממזונו של הבז. גם המקור של השקנאי המצוי (תמונה מס'...) בולט בצבעיו המיוחדים. השק הכתום בתחתית המקור מרמז על הצורך בגמישות לכיפוף ובחוזק לחיתוך. תכונות המובנות מאליהם כשחושבים על תפקודו המיוחד של השק בהתמלאות בדגים רבים ככל האפשר.

ציפור מוכרת מאד בארצנו, ורואים אותה הרבה גם בין השיחים ועל העצים שבין בתים בשכונות עירוניות, היא השחרור ממשפחת הקיכלים. ליד חלון דירתי העירונית גדל עץ תות גדול ומזה שנים שאני עוקב אחרי התנהגותו של השחרור ונהנה מזמירותיו המיוחדות ומשיחותיו עם בת זוגתו החומה. הוא זה שמשכימי בבקרים במשך מרבית ימות השנה. לאות תודה, מצאתי לנכון להקדיש גם לו כמה שורות. כל גופו של הזכר שחור ורק מקורו כתום צהוב מבהיק. מזונו העיקרי: תולעים, חלזונות וחסרי חוליות המצויים מתחת לעלים של שיחים ועצים. לעיתים הוא אוכל גם ענבות הגדלים על השיחים או העצים, כמו למשל את התותים בטרם הבשלתם. ראו תאור ב- [2]. הצבע השחור על כל גוף הזכר מצביע על כך כי הציפור מצויה מרבית שעות היום במקומות חמים. השחור מצביע, לפי טבלה 2, על בידוד חם. אכן, בעקבות רמז זה אני מבין שבתחתית השיחים חם יותר מאשר על הענפים מרכזיים שלהם. יש בכך הגיון כאשר לוקחים בחשבון שהרוחות נבלמות באזור צמוד קרקע זה. בנוסף לכך, הקרקע עצמה פולטת חם. לכן גם הגחון של השחרור הזכר שחור. אנו רואים

כאן כיצד התכונות של הצבעים עוזרות לנו להבין את התנאים המיוחדים במקומות שלא היינו נותנים עליהם את הדעת. כדאי להשוות את תמונתו של השחרור לתמונתו של קיכלי שחור גרון, בעל הגחון הלבן [2]. הלבן מרמז אצלנו על בידוד בפני קור. אכן, בית גידולו של קיכלי זה הוא הטאיגה וסבכי שיחים תת-אלפיניים. העובדה שכל גופו של השחרור בעל צבע אחיד מרמזת לי כי ציפור זאת אינה מתמרנת הרבה. אכן, כדי להשיג את מזונה מבין העלים השרועים על הקרקע, בינות השיחים, אין צורך בתמרונים מיוחדים ולא בתעופה למרחקים גדולים. המזון קיים בשפע רק צריך למצוא אותו מתחת לעלים ולאכול. את שיטת החיפוש אני מכיר היטב. הוא מפזר את העלים לצדדים בעזרת מקורו עד שהוא מוצא מזון. אך, חלק מהעלים עלולים להיות תקועים בין ענפי השיחים. הדבר העלול לגרום לחיתוך המקור. מכאן, כנראה, הצורך של השחרור במקור בעל חוזק בפני חיתוך עם גמישות לכיפוף, כפי שתכונות הצבעים צהוב וכתום בטבלה 2 מרמזים. גם תכונת היכולת להתפשטות בחם ושימור חם של הצבעים הללו עוזרת בתפקוד המקור במקומות חמימים אלו בתחתית השיחים. אצל הנקבה של השחרור הצבעים בהירים יותר. זהינו הגוף פחות שחור ומתקרב לחום והמקור פחות כתום. היא כנראה פעילה פחות מאשר הזכר בהשגת המזונות. מוכרת אצל בעלי חיים רבים התופעה שהזכר מביא מזון לנקבה המטפלת זמן רב יותר בקן ובגוזלים.

אצל יונים רואים לעיתים קרובות פסים צבעוניים רוחביים בצווארם. היונה, כמו ציפורים רבות אחרות, מכווצת את הצוואר בשעת מנוחה ומאריכה אותו, כמו קפיץ, בשעת חיפוש מזון או לצרכים אחרים. הצבעים מרמזים גם כאן על הצרכים המכניים המיוחדים בתפקוד הצוואר.

### 3.ג) פרפרים

מזונם של פרפרים וחרקים רבים אחרים הוא צוף פרחים. לכל פרפר הפרחים המיוחדים לו המצויים בתפוזרות מוגדרות, בשעות ובעונות מוגדרות. בהתאם לכך מפותח בפרפר כושר תעופה, אשר אינו מהיר במיוחד אך מותאם להפליא לצרכי מעבר מפרח לפרח בקצב המתאים לליקוט צוף בכמות הנותנת לפרפר אנרגיה הגדולה מזאת המתבזבזת על ידו בעת הליקוט. על הקשר ההדוק בין פרפרים מסוימים לצמחים מסוימים ניתן לדאות למשל בספרו של איזנשטיין [11]. אני אינני מופתע מהדמיון הרב בין העורקים בכנפי פרפרים לעורקים של עלים רחבים בצמחים רבים. עלים רחבים צריכים לעמוד בתנאי רוח קלים, זהינו האויר נע באיטיות ביחס לעלה. גם כנף הפרפר המעופף נעה באיטיות ביחס לאויר. בשני המקרים יש תנועה יחסית איטית של משטח ביחס לאויר. לכן ניתן לדעתי לצפות לחיזוקים דומים. הדמיון הרב בין צורת העורקים בעלים רחבים לבין צורת העורקים בכנפי פרפרים רבים מצביעה על פתרון הנדסי פיסיקלי דומה להשגת החיזוקים הדרושים. כנפי כל פרפר מותאמות לצרכי התעופה המיוחדים שלו. הצורה הגאומטרית של כנף הפרפר נותנת את הבסיס האוירודינמי לתעופה הרצויה. אולם לפרפר יש בעיה מכנית רצינית. הכנף הגדולה יחסית לגופו מוחזקת רק בקטע קצר מאד הצמוד לגוף. המומנט (משקל\*מרחק) של הקצה המרוחק של הכנף, ביחס לקטע אחיזה זה, הוא אדיר. כל תוספת משקל מבנית זעירה בקצות הכנף שקולה, מבחינת העומסים, לתוספת משקל גדולה מאד באזור הגוף. בנוסף לכך, על הכנף לבצע תנועות מחזוריות מעלה-מטה. כלומר על חלקי הכנף לעמוד גם בתאוצות משתנות. לכן המומנטים על כל חלק בכנף גדלים בהרבה והאילווצים על הכנף עצומים. הקורא יכול להמחיש לעצמו את הסיטואציה ע"י שיקח ניר עיתון בגודל של משבצת ריצפה וינסה להחזיק אותו אופקית כשהוא אוחז באחת הפינות. הניר יתכופף. כדי למנוע את כיפוף הניר יכול הקורא לקער את הניר בעזרת האצבעות של היד האוחזת בפינה. עתה ינסה נא הקורא לנפנף בניר. הניר יתכופף. אותן בעיות מכניות הנדסיות קיימות גם בכנף הפרפר.

כדי למנוע את כיפוף הכנף יש להוסיף חומרי חיזוק שמשקלם הסגולי קטן. אני סבור שהחמרים הצבעוניים בכנף הפרפר הם גם חומרי חיזוק שונים. יתכנו גם חיזוקי מבנה מיוחדים, הנותנים צבעי מבנה, התואמים את האילווצים המיוחדים בכל איזור בכנף. בכנפי פרפרים רבים יש גם שילובים של צבעי חומרים וצבעי מבנה (עמ' 48 ב-12). כמעט בכל פרפר ניתן להבחין בבירור בצבע המיוחד בשפת הכנף הנראית כמסגרת חיזוק. לעיתים צבע המסגרת בולט, בד"כ שחור, ולעיתים דרושה התבוננות ממוקדת כדי להבחין בהבדל. הקשקשים של כנפי פרפרים רבים מסתימים, לאחר צבע המסגרת, בריסים זעירים, כמו חוטי

קצה של שטיח. ראו, למשל, צילומים מוגדלים של קשקשי פרפרים בתמונות 28-37 ב-[12] ובמדריכי פרפרים כגון [19]. יש גם צבעים מיוחדים באזור הקרוב לחיבור שבין הכנף לגוף. כמו כן נוכחים כי הכנף מורכבת למעשה מרצועות קשתיות העוזרות בחיזוק. דוגמאות מצוינות ניתן לראות בפרפרים זנב הסנונית (תמונה מס'...), נמפית הקטלב, דנאית תפוח סדום, ועוד. הצבעים מחולקים בצורה הנדסית מוגדרת לאורך הרצועות. למי שמתמצא בהנדסה וחוזק מבנים בתעופה יהיה קשה להתעלם מהקשר שבין אופן חלוקת הצבעים בכנף הפרפר לבין האזורים הצפויים לעומסים ולגמישויות מיוחדות בשעת הנפנוף. לכל פרפר הצבעים והחלוקה המתאימים לצורכי התעופה. שני הכתמים האדומים הנראים בבסיס הזנב של זנב הסנונית עשויים להצביע על צורך מיוחד בגמישות לכיפוף באזור זה. יש בכך הגיון כאשר מבנים את דרישות הגמישות של קצות הזנב המוארכים הנחוצים לתמרון יעיל, בדומה לתפקיד הזנב של הציפור סנונית בעלת ביצועי התמרון המרשימים. גם במטוסי נוסעים (של בואינג למשל) משתמשים לעיתים בתכונות התמרון שמאפשר זנב מפוצל נטוי לאחור כדי לפצות על כך שהכנפיים הקדמיות במטוסים כבדים אלה אינן משוכות לאחור. גם לדגים רבים יש זנבות מתפצלים המקנים להם כושר תמרון. זנבותיהם של הכריש והלווייתן תורמים לאותה מטרה. אנו רואים כאן דוגמא כיצד הסקנו מסקנות מענינות רק מתוך התבוננות בשני הכתמים האדומים בפרפר זנב הסנונית ובהתחשב בטבלה 2.

מצאתי גם הסבר פיסיקלי מעניין לגבי התפקוד הפיסיקלי המשוער של העיניים היפות על כנפי פרפרים ורפרפים, כגון שבתאי השקד, נמפית החורשף, סטיריות שונות, (ראו תמונה מס'...), כחליל מקושט, כחליל מצוי ועוד. ההשערה הראשונית שלי, הזורשת חקירה יסודית, היא שכתמים אלה הם אמצעי בקרה על מידת המתיחות של הכנף. לאזורים בעלי צבעים שונים יש מקדמי התפשטות חם שונה ו/או התכווצות קור שונה. (ראו טבלה 2). הכתמים הצבועים בצורות סימטריות מיוחדות מאפשרים התכווצות והתרחבות בכיוונים מוגדרים באזור הכתם מאשר באזורים אחרים. באופן זה יכולה הכנף להתאים את עצמה למידות החם וללחצי האויר המשתנים. כלומר הצבעים על הכנף של פרפר יכולים להיות לא רק לצורכי חוץ, כמוסבר לעיל, אלא גם לצורכי בקרה על מתיחות הכנף וגודלה בתנאי סביבה המשתנים בתדירות גבוהה בעת מעוף הפרפר בין הפרחים והעלים, אשר חלקם בשמש וחלקם בצל. נניח לרגע שאין בקרה כלשהי על ההתפשטות הכנף ונניח שבשעת בוקר אורך רצועה מסוימת של קשקש הפרפר הוא 5 ס"מ. נניח שבשעת צהריים הקשקש התארך, למשל עקב עליית הטמפרטורה בסביבה, ל-5.5 ס"מ. תוספת קטנה זאת של 0.5 ס"מ בקצה הכנף מוסיפה מומנט גדול (משקל\*מרחק) על הכנף ויתכן שהפרפר יתקשה לעוף בתנאים החדשים. יש לקחת בחשבון גם שטמפרטורה גבוהה יותר גורמת לאויר להיות דליל יותר. לכן התווך שבו נעה כנף הפרפר משתנה והפרפר עשוי להתקשות בתעופה מסיבות שונות. מכאן החשיבות העצומה אצל כנפי הפרפרים לפיקוח והבקרה על מתיחות נכונה של הכנף כולה בהתאם לתנאי הסביבה המשתנים. פסי רוחב צבעוניים בקשקשי הפרפרים עונים על הבקרה למתיחות של כל קשקש בנפרד. אך יש צורך בתאום בין הקשקשים ואולי זאת הסיבה לצורות הגאומטריות המענינות בכנפי הפרפרים.

חיזוק מסויים לרעיון, של תרומת הצבעים בכנפי פרפרים ליכולת התאמתם לתנאי סביבה משתנים, אני מוצא בפרפרי החרמון. במהלך הכנת חוברת זאת, במאי 1998, טיילתי עם קבוצה בכתף שיאון שבחרמון והסתייעתי בכרך חרמון-גולן של מדריך ישראל [42]. בעמ' 15 מתוארת תופעה מענינת בחרקים החיים בהרים גבוהים בעולם: אובדן כושר התעופה של החרקים - הגוברת ככל שמגביהים רום. בספר מוסברת התופעה ברוחות העזות המונעות מחרקים מסוימים לעוף, ומכאן הניוון של כנפיהם. אני סבור שההסבר הרבה יותר עמוק הוא קשור בירידה הדרסטית בצפיפות האויר. כידוע, צפיפות האויר יורדת מאד (בצורה אקספוננציאלית ככל שמגביהים רום, עבור אותה טמפרטורה סביבתית). בתנאים רגילים, בגובה פני הים, כנף בעלת שטח מסוים אמורה לדחוף בכל נפנוף מינימום מסוים של מסת אויר כדי שהחרק יתרומם ויתקדם. אם צפיפות האויר פוחתת באופן דרסטי מסיבה כלשהיא, למשל כשעולים לגובה שמעל 1000 מטר, עשויה מסת האויר הנדחפת להיות נמוכה מהמינימום הדרוש. אם הכנף אינה בעלת כושר התפשטות מספקת אין לאותו חרק יכולת תעופה שם. אם הוא מצליח לפתח כושר שרידות ללא תעופה אז כנפיו מתנוונות. כך למשל קורה עם החגב הגדול, סלעם יפה-הרגל, אשר אותו, או דומה לו היה לי את הכבוד לפגוש באותו טיול. אכן, כפי שכתוב בספר, ניתן להתקרב אל החגב הזה ואפילו לגעת בו מבלי שהוא עף. לכל היותר, כאשר נמאס לו ממני הוא ניתן למרחק של מטר. חגב בעל יכולת תעופה באזור השפלה כבר היה נס על פניו למרחק של עשרות מטרים. צבעו של החגב היה חום בהיר כמעט לאורך כל גופו. באותה עת לא הקדשתי תשומת לב לצבעי



רגליו, אך על פי הספר הצד הפנימי של רגלי הקפיצה שלו הוא כחול ופרקי הרגליים כתומים. הצבע הכחול מצביע, לפי טבלה 2, על גמישות לפיתול, חוזק למתיחה, התכווצות בקור ובידוד חם. הצבע הכתום מצביע, לפי אותה טבלה, על גמישות לכיפוף, חוזק לחיתוך והתפשטות בחם. אכן, נקל להבין כיצד תכונות אלו עוזרות לרגלי החגב לתפקד בתנאים המיוחדים בהם הוא נתון. עד כאן לגבי החגב המעניין, אך אנו רוצים לדון כאן בפרפרים. ובכן, למרות השינויים הדרסטיים בצפיפות האויר והקשיים של חרקים מסוימים לעוף בחרמון, מתברר על פי אותו ספר כי היו בחרמון לפחות 84 מינים שונים של פרפרים. עוד נאמר כי אף מין של פרפר אינו אנדמי לחרמון או לרכסי הלבנון. כעשירית מבין המינים מוצאם מדברי. נתונים אלה מלמדים על כושר ההסתגלות המדהים של הפרפרים לתנאי סביבה קיצוניים ובהם שינויים דרסטיים בצפיפות האויר. אמנם, גם במדבר צפיפות האויר נמוכה ביום, בגלל טמפרטורות גבוהות, אך בין המדבר והחרמון היה על הפרפרים לעבור באזורים בעלי תנאים רגילים וצפיפויות אויר נורמליות לגובה פני הים. לא מן הנמנע שהצבעים המיוחדים בכנפי הפרפרים עוזרים לכנפיים להתאים את שטח הכנף לצורכי התעופה. בהסברי לעיל קישרתי את הצבעים של כנפי הפרפרים לכושר ההסתגלות לשינויי חם, באמצעות מקדמי התפשטות שונים בחם של חומרים בעלי צבעים שונים. מקדמי התפשטות כאלה תלויים גם בלחץ בו נתון החומר. לחצי אויר וצפיפויות אויר קשורים זה בזה קשר אמיץ. גם למידת הלחות יש השפעה על מקדמי התפשטות שונים. לא ארחיב כאן על נושאים פיסיקליים אלה. המעוניינים בהרחבה יכולים לעיין, למשל, בתורת החם של [1]. מה שחשוב להדגיש, בענייננו, היא האפשרות שהצבעוניות של כנפי הפרפרים חשובה ליכולתם לעוף בתנאי סביבה משתנים.

גם כאן אנו נוכחים כיצד נקודת המוצא של סל המזונות של הפרפר מוביל אותנו להבנת המכשולים עליהם עליו להתגבר. במקרה הזה מדובר בתנועה בתווך ( אויר ) שתכונותיו הפיסיקליות משתנות ללא הרף, מבחינתו של הפרפר. עתה אנו יכולים לנסות להבין את המבנים והחומרים המיוחדים הדרושים כדי להתגבר על המכשולים. ומכאן ועד להבנת תפקודי כל צבע הדרך לא ארוכה.

להלן אביא עוד שני נימוקים התומכים בגישה החדשה: ראשית, הסימטריה המדויקת של הצבעים בכנפים משני צידי גוף הפרפר. כל אי סימטריה קטן יכול לגרום לבעיות יציבות ואיזון בשעת התעופה. לאלה הדוגלים בדעה כי צבעי הפרפר נועדו להסוואה ברצוני להעיר כי אחד האמצעים החשובים בהסוואה הוא דווקא שבירת סימטריה. לנו קל לזהות פרפר מרחוק דווקא בשל הסימטריה המופלאה. שנית, ידוע שכושר התעופה של הפרפר נפגם כאשר מסירים אבקה מכנפיו. לי נראה שבהסרת האבקה אנו משנים את המשקלים הסגוליים על פני הכנף. דומה הדבר להסרת משטחים באזורים שרירותיים מכנף המטוס.

ברפרים הנעמדים מעל פרח ומרפרפים בכנפיהם תוך כדי יניקת הצוף צורת הכנפיים מוארכת יותר מאשר אצל פרפרים. הרצועות המרכיבות את הכנף ארוכות בהתאם. הצבעים לאורך כל רצועה נראים כמסודרים בהתאם לצרכים הנדסיים מכניים ברורים. מאחר והרצועות עצמן, רוחבן ואורכן, מסודרות בצורה אוירודינמית הנדסית מסוימת מתקבלים פסים צבעוניים רוחביים מסודרים. ראו למשל, רפרף ההרדוף ( תמונה מס' ... ) ורפרף משורטט.

טוואי המשי, אשר צורכי התעופה שלהם מצומצמים בהרבה משל הפרפרים והרפרפים, ואין עליהם לבצע תמרונים מסובכים, צבעיהם אחידים יותר ללא הגיוון הרב שיש אצל פרפרים ורפרפים ( ראו למשל עמ' 330 ב-[12] ).

#### 4. ג. חרקים נוספים

בשפיריות זבובים, העפים במהירות גדולה מאד ביחס לפרפר, הכנפיים מוארכות ומרושתות מאד לשם חיזוק. מבנה הרשתות בצורת משושים הוא הפתרון האידיאלי ליחס שבין חוזק ומשקל. בכוורות דבורים יש שימוש באותו פתרון. בשפיריות זבובים העומסים על הכנף גדולים מאשר אצל כנף הפרפר. לכן לא די כנראה בתוספת חיזוקים ע"י חומרים קלים אלא יש לעשות חיזוקים מבניים הבאים לידי ביטוי ברשת הצפופה. אולם גם אצל השפיריות רואים לעיתים קרובות כתמים שחורים באזורים המועדים לשבירה. ראוי לציין עוד כי הרשתות בכנפיים אלה הן אפורות. הצבע האפור כנראה קשור עם חמרי טבע בעלי

חוזק יחסי רב כפי שניתן להיווכח בקליפות האפורות של עצים רבים. בזכר של השפרירית הסורית רואים בברור כתמים שחורים בקצות הכנפיים ( תמונה מס'... ). לא מן הנמנע שכתמים אלה נחוצים לתוספת חוזק למתיחה והקטנת ההתפשטות בחם של הכנף כדי לשמור על אורכה בעת שהשפרירית נעה בין אזורים קרירים יחסית, על פני המים, לבין אזורי היבשה החמים יותר.

בעכבישים רואים לעיתים בברור צבעים מיוחדים לסרוגין לאורך הרגליים. ניתן להבין כתמים אלה בכך שהרגל הארוכה דורשת חיזוקים וגמישויות מיוחדים לכל אורכה. ראו למשל כסופי דלפסים ( תמונה מס'... ), כסופי משונן [13], ואלמנה שחורה [40]. הצבעים הכתומים נותנים, על פי טבלה 2, גמישות לכיפוף וחוזק לחיתוך. הכתמים השחורים נותנים חוזק למתיחה. מבט קצר על רגליו של כסופי דל-הפסים שבתמונה מפגין תכונות אלו. גם בגמלי שלמה ניכרים לעיתים קרובות כתמים או פסים לאורך הרגליים. ראו למשל תמונה מס'... של סוסת השד שזרועותיה הארוכות הן בפסים לסרוגין של כתום וחום. גם בצבע החום ניתן למצוא חוזק למתיחה. אך בנוסף יש לו גמישויות לכיפוף ולפיתול. לא קשה לדמיין את המאמצים והגמישויות הנדרשים מזרועות אלה בשעה שסוסת השד צדה ואוכלת את קורבנה. על הסיבות הפיסיקליות לצבעים בחלקי גוף אחרים של החרקים אקווה לדון בעתיד. כאן ארמוז רק שפטי הרוחב הבהירים בבטן של דבורת הדבש וחרקים אחרים עשויים לרמז על הצורך בגמישויות וחיזוקים הדרושים לכיווצים ולהתרחבויות של הבטן. עולה בדעתי שהתכווצויות אלו עוזרות לדחוף את המזון פנימה בדומה להתכווצויות מערכת העיכול שלנו הדוחפת את המזון. אצל הדבור יש פס כתום רחב על הבטן החומה. לא מן הנמנע כי הפס הכתום עוזר כאן גם בשימור חם הבטן בשעה שהמזון מתעכל בה. זאת בנוסף לתכונות הפיסיקליות האחרות המוצגות בטבלה 2.

זחלי פרפרים רבים מציגים כתמי חיזוק וגמישות ממש צועקים באזורים מוגדרים בגופם. למשל, הזחל של הפרפר ( תמונה מס'... ). דומני כי לאחר כל שהסברתי לעיל, כל מילה נוספת מיותרת כאן.

חיפושיות פרות משה. מזון בד"כ: כנימות ואקריות המצויים על עלי [13]. צורתן וצבעיהן: כמו חצי כדור עם נקודות או כתמים סימטריים על הכנפיים. בחיפושית פרת שבע הנקודות הנפוצה יש 4 נקודות שחורות על כל כנף אדומה. כאשר הכנפיים סגורות מתלכדות שתי נקודות לאחת. בעמ' 16 בספר על החרמון של [42], מודגשת גם פעילותן יוצאת הדופן של חיפושיות אלו. הן זקוקות מאד לחם סביבתי כדי שכנפיהן תהינה יעילות. מטבלה 2 לעיל אנו נוכחים כי הצבע האדום קשור בהתפשטות בחם בנוסף לבידוד חם. כמו כן הוא קשור לגמישות לכיפוף ובחוזק למתיחה. תכונות אלו וודאי נחוצות לבעל חיים זה. הנקודות השחורות עוזרות, ככל הנראה לי, לשמור על מתח נכון של הכנף בשינויי חם סביבתיים. המבנה החצי כדורי שלה, ושל חיפושיות רבות אחרות, עוזר כנראה ליציבות וחוזק של המבנה הקל. גם קשתות בגשרים ומבנים היסטוריים נעזרים באותה תכונה הנדסית ידועה.

ג.5 ( יונקים.

גם ביונקים ניתן להבחין בחלקים שונים הצבעים בצבעים מיוחדים המרמזים על תפקודים מוגדרים בהתאם לטבלה 2. דוגמאות בולטות הן צבעי שער הראש, הציפורניים, אזור האף (כלבים וחתולים למשל), הזנבות ועוד. ראו למשל במדריך היונקים של שלמון [33]. אחד המאפיינים הבולטים של היונקים הוא השער המכסה חלקים שונים של העור. על התכונות המכניות של שערות בעלי צבעים שונים אין צורך להרחיב כאן. כאן ברצוני להתעכב על תכונותיו החומניות של השער בצבעים השונים, כפי שהן באות לידי ביטוי בטבלה 2. תפקידו העיקרי של השער הוא לשמור על חם הגוף בגבולות טמפרטורה מוגדרים. כאמור, צבע שחור עוזר לבדוד את הגוף בפני חם סביבתי גבוה מידי בעוד אשר צבע לבן עוזר לבדוד את הגוף בפני קור סביבתי גבוה מידי. דוגמאות יש בשפע. די להתבונן בצבעי השער של יונקים הפעילים באור היום באזורים החמים ( כגון קופים, פילים, דובים חומים, ועוד ) לעומת השער הלבן של יונקים באזורים הקרים כגון דב לבן, שועל שלג, ועוד. יש גם צבעי ביניים בגוונים שונים בין שחור ולבן בהתאם לרמות החשיפה לחם השמש או קור בלילה או במחילות. ביונקים רבים רואים שהגב כהה והגחון לבן ( יעלים, סוגי כלבים, סוגי חתולים

ועוד). ראו למשל תמונות מס'... ו... של יעל וכלב פינצ'ר. להערכתך, לא מן הנמנע כי גחון לבן עוזר ליונק להתגונן בפני הקור מהקרקע בשוכבו במקום מוצל. גם לפסי הפיגימה של הזברה ניתן למצוא הסבר פיסיקלי ראשוני הדורש עוד מחקר מקיף (ראו תמונה מס'...): מזונה של הזברה, כידוע, הוא עשב באזורים הקרובים למים. פסיה השחורים, המסודרים לסרוגין לאורך כל אחד מחלקי גופה, מרמזים על דרישות לחוזה למתיחה בכיוונים מוגדרים. שני הנתונים הללו מצטלבים אצלי לאפשרות שהזברה פיתחה שיטה לגרוש החרקים העוקצניים הרבים הנטפלים אליה בשעה שהיא מתמקדת במזונה. לא מן הנמנע כי הרעידות התדירות של עור גופה מתאפשרות בזכות קיום הפסים השחורים בעלי חוזק למתיחה הגדול. סיבה זאת היא כנראה גם הגורם לכך שלזברה יש עור חזק במיוחד. גם הזנב עוזר לה להרחיק מציקים, אך הוא מגן בעיקר על האחוריים. זנב ארוך יותר, שיגיע עד לראשה, אינו בא בחשבון לא רק מהטעם שהוא ישתרך על הקרקע וידרוש הגנות מיוחדות משלו, אלא גם בגלל הצורך בתוספת שרירים חזקים במיוחד, באזור חיבור הזנב, כדי להניף את הזנב הארוך לכל עבר.

כדי להמחיש את הקשר שבין צבעים לתכונות פיסקליות נתמקד מעט יותר בשועלים (ראו ערך שועל ב-[3]). בתמונה מס'... אנו רואים שועל מצוי שצולם בארץ. סימן הזיהוי שלו הוא הצבע השחור בצד האחורי של האפרכסת. זהו שועל המצוי במשך היום במחילות ופעיל בשטח בלילה, אם כי בצפון הארץ רואים אותו גם ביום. כלומר הוא מעדיף תנאים קרירים. סל מזונותיו: חרקים, כרסמים, זוחלים, ציפורים, פירות ועוד. כלומר תפריט רחב למדי. בהתאם לכך גם תפוצתו הרחבה בעולם. גוני השער השולטים אצלו הם חום, אפור וצהוב. באירופה יש גם אדום. צבעי גחונו אפור עד שחור. שועל הנגב הוא בעל צבע כללי בהיר וגחון לבן. על פי טבלה 2, התכונה המכנית של הצבע השחור הוא חוזק למתיחה. לצהוב יחסו חוזק לחיתוך. בצבע החום יש גם גמישות לכיפוף ועמידות בלחץ. באדום גמישות לכיפוף. כל התכונות הללו חיוניות לבעל חיים החי במחילות. החיכוך המתמיד עם דפנות המחילה מחייב חיזוקים נגד מתיחה בגב אך בעיקר בגחון, מכאן תרומת השחור. את העמידות בלחץ נותן הערוב עם לבן, למשל צבעי אפור וחום. את החוזק לחיתוך תורם הצהוב. את הצורך בגמישות לכיפוף השער תורם האדום. מכאן ניתן להסביר את הצבעים של השועל המצוי. יתכן שצבעיו הבהירים יותר של שועל הנגב נובעים מכך ששם החול יותר נוח לחפירת מחילות רחבות. הגחון הלבן של שועל הנגב מצביע על הצורך בבידוד בפני קור של הקרקע בלילות הנגב. ליונקים אחרים החיים במחילות יש גם גונים של שחור ואפור. למשל, הגירית, הדרבן, החפרפרת, החולד והעכבר (ראו ערכים ב-[3]). גופה של הגירית אפור והגחון שחור. גם רגליה שחורות. בעזרתן היא מבצעת את מלאכת החפירה. במלאכה כזאת דרוש הרבה חוזק בפני מתיחה. גופו של הדרבן שחור או חום-שחור. קוצי הגב שלו שחורים ולבנים לסרוגין. הדרבנים חיים במחילות בהרים צחיחים ובאזורים סלעיים. ללבן תכונה מכנית, לפי טבלה 2, של עמידות בלחץ. תוספת הצבע הלבן לקוצי הדרבן מרמזת, לכן, כי הקוצים משמשים לתמיכה של תקרת המחילה למקרה והיא מתמוטטת. התמוטטות סלעית בתוך המחילה עלולה למחוץ את בעל החי שם. הדבר פחות קריטי בגירית לחפור במהירות ולצאת מהמלכודת. אך אם הדרבן נלכד במפולת סלעים פנימית אין לו פתרון. על בעיותיהם המיוחדות של שוכני מחילות ארוכות יכולים לספר מהנדסי כורי פחם ומחצבים. את הבעיות בעת התמוטטות רואים לעיתים בסרטים ויומני חדשות בטלוויזיה. הפתרון של קוצי הדרבן עשוי לרמוז גם על הפתרון הבטיחותי הנכון עבור עובדי הכורים. החודים של הקוצים עשויים, במקרים מסוימים, אפילו לפורר את הסלע המתמוטט. מכאן שמעטה מתכתי בעל חודים ארוכים יכול להיות בטיחותי יותר לכורים. נחזור לשועלים. בתמונה של השועל המצוי רואים כי האף, המשמש להרחה וחיפוש מזון, הוא בצבע שחור. זאת אותה הסיבה שאצל מינים אחרים במשפחת הכלביים, עליה עמדנו לעיל. המאפיין העיקרי של הסוג שועל הוא זנבו העבה והארוך. בגב בסיס הזנב יש צבע שער השונה מהצבע הכללי. צבע שונה זה מצוי באזור שעיר שמעטר בלוטה תת-עורית מיוחדת. כמו אצל החתוליים, מצביע הזנב העבה של השועל על צורך באיזון ויצוב כאשר הוא מבצע תמרונים מסובכים בעת הרדיפה אחר המזון החמקמק. הבליטה התת-עורית מרמזת, כנראה, על המומנט הגדול של הזנב הארוך על נקודת החיבור לגוף. מכאן הצורך בחיזוק שרידי מיוחד של אזור החיבור וזוהי, להערכתך, תפקודה של הבליטה. צבע השער המיוחד באזור בליטה זאת מרמז שיש להגן עליה באופן מיוחד מעבר להגנות על יתר חלקי הגוף. אני משער שהצורך בתמרונים כה מסובכים להשגת המזון הם אלה שהקנו לשועל את מידת הערמוניות הרבה המיוחסת לו ע"י בני אנוש. על פי [3], בשועל השלג, קימות שתי תופעות צבעים. א) צבע חום בקיץ ולבן בחורף. ב) צבע כחול-כהה בקיץ וכחול בהיר

(תכול) בחורף. את תופעה א' קל להבין לאור מה שהסברנו לעיל. הצבע החום בקיץ משלב בו תכונות מכניות וחומניות מרובות, כפי שנוכחים מטבלה 2. הצבע הלבן בחורף נועד בעיקר לבידוד בפני קור. תופעה ב' מעניינת במיוחד. לתכול יש, על פי טבלה 2, תכונה חומנית של התכווצות בקור. הכחול מתקבל מתכול פלוס שחור. לכן יש לכחול גם תכונה חומנית של התכווצות בקור וגם תכונה מכנית של חוזק למתיחה, בנוסף לתכונות האחרות. מעניין לשים לב שבשתי התופעות הללו יש תוספת שחור בקיץ. זה מרמז לי כי בקיץ מרבים שועלי השלג לצאת ולהיכנס למחילות. תכונת ההתכווצות בקור חשובה עבור שועל החי באזורים בהם הטמפרטורה עשויה לרדת עד מינוס 80 מעלות צלסיוס. לדב הלבן יש הגנות נוספות בפני קור, בעיקר שכבת השומן התת-עורית שלו. תוספת שומן כזאת לשועל בקוטב היתה מקטינה את מהירותו וכושר התמרון שלו ובכך היתה נפגעת יכולתו לצוד את מזונו באזור כזה. לכן, כנראה, מצא הטבע את הפתרון של תוספת בידוד לקור של הפרווה עצמה, דבר המתבטא בצבע התכול.

לג'ירף גוף חום ומשבצות צהובות. כל התכונות של הצבע החום, הניתנות בטבלה 2, נחוצות לחלקים גליליים מאורכים של גוף הג'ירף החי במקומות חמים. המשבצות הצהובות נותנות תוספת חוזק לחיתוך. ראינו גם אצל רגלי חרקים מסוימים את הצורך בתוספת חוזק לחיתוך, דרך הצבע הכתום (שהוא, כזכור, שילוב של אדום וצהוב). המיקום המדויק של פסי הצבע הצהוב בג'ירף עשוי להצביע על נקודות התורפה בעורו העלולות להחתך עקב תנועותיו המיוחדות. תתי-המינים של הג'ירף משיגים, כל אחד, סל מזונות שונה במקצת מזה של תת-מין אחר. לכן האילוצים המכניים שונים ומכאן התבניות השונות של המשבצות הצהובות התתי-מינים שונים של הג'ירף.

## 6.ג דגים

על צורתם ההידרודינמית המופלאה של הדגים דיברו רבות. אולם מאלף להיווכח כיצד חלקים פונקציונליים מוגדרים בדגים הם בעלי צבעים מוגדרים המבדילים אותם לעיתים רבות מצבעי החלקים האחרים. בדגים הזקוקים לתמרונים מסובכים כדי להשיג את מזונם, כגון דגים בתוך שוניות אלמוגים באילת, ניתן לראות בברור שהזנב והסנפירים צבועים בד"כ שונה מאשר הגוף. למשל, משפחת הפרפרוניים, משפחת הקיסריים, נתרן צהוב, פזית ים-סוף, זהרון הדור, אבנונית עדינה, ברקן הנזר ועוד. ראו למשל, ב- [15], [16], [32]. ראו גם תמונות כאן של זהרון מקרין, פרפרון האודם, פרפרון אפור-לחי, קיסר הדור, וריולה סיסית ונתחן סגול. באזור החיבור של הזנב והגוף רואים לעיתים קרובות כתם ברור. שם השריר חייב להיות חזק במיוחד, שכן הזנב הוא המנוע הדוחף את הדג קדימה.

נתעכב מעט על מנהגיו של הנתחן הסגול שבתמונה. מזונו: אצות הגדלות על שולחן השוניית. הזנב אצל דגים רבים הוא אבר התנועה העיקרי של הדג בתנועתו קדימה. הסנפירים עוזרים בד"כ בפניות ובנסיגה אחורה. כאן מודגשים התפקודים של הזנב וסנפיר החזה. מתוספת הצבע הצהוב בסנפיר החזה אני מסיק כי לדג זה חשובה מאד שהזנב יהיה בעל חוזק לחיתוך. כנראה שהדבר נחוץ לו בעת הנסיגה אחורה. יש בכך הגיון, שכן גופו פחוס וגבוה ופיו מוארך במקצת. כך שמתאפשר לו להנות מאצות שבתוך סדקים. אך הדרך היחידה להמשיך לאתר את המזון הבא היא לסגת אחורה ורק אחר כך לשנות את כיוון גוף ולהתקדם באמצעות הזנב. זה תפקוד קצת שונה מאשר לשחות כל העת ברדיפה אחר דגים. מכאן גם הצבעוניות המודגשת של הזנב. אך בכך אין די. דג זה הוא ממשפחת הבתרניים אשר להם קוץ בבסיס זנבם שבמינים מסוימים הוא קבוע ובמינים אחרים, כמו כאן, הוא יכול להשלף ולחזור למקומו. על פי "הגישה החברתית" משמש הקוץ להגנה או כנשק במאבקים בין מיניים. אך על פי "הגישה הפיסיקלית" אלו הם שימושים משניים בלבד של קוץ. את השימוש הראשוני שלו עלינו לחפש בתפקודי הדג עצמו כדי שישגי את מזונו. הרמז העיקרי לפתרון התעלומה מצוי בעובדה שהקוץ נעוץ בדיוק בבסיס הזנב. כאשר הדג נכנס לתוך סדק עליו להאחז בסלע לבל יבוא זרם מים פתאומי ויתקע אותו בפנים. הקוץ הקבוע, או הנשלף, עשוי לאפשר לו אחיזה כזאת. קיום הקוץ בבסיס הזנב מאפשר לשלוף אותו מהסלע בתנועה חזקה הצידה של הזנב. תנועה כזאת עלולה להפריד בין חלקי הזנב (חיתוך) מכאן הצורך בחוזק לחיתוך המוקנה, לפי טבלה 2, ע"י הצבע הצהוב. הסבר זה, וההסבר על הקוץ בתמונה על הזהרון המקרין, נותן תשובות לגבי קוציהם של סוגים רבים של דגים: אחיזה בסלעי השוניית או בקרקע כדי לעזור בהשגת מזון. הקוצים בקצות הזנבות של בתרניים אחרים עשויים לשמש למטרה דומה של אחיזה בסלע לבל

יסחפו לתוך הסדק. עולה בדעתי כי גם קיפוד הים עשוי להעזר בקוציו כדי להאחז בשונית בכיוונים שונים כך שיהיה מרחק מסוים בין פיו והמשטח הסלעי ממנו הוא מגרד את האצות באמצעות שיניו החדות. באופן זה יכול קיפוד הים להשאיר במקום אחד זמן מספיק ארוך ולגרד משטח די גדול. השליטה של קיפוד הים בכיווני הקוצים חשובה למציאת נקודות אחיזה מתאימות רבות ככל האפשר.

מאלף להשוות צבעיהם של דגים החיים בתוך השונית לאלו החיים בים הפתוח או מסביב לשונית, כמו הברקודה למשל, או אפילו קבוצות הדגים הענקיות הנוהגות כגוף אחד בחפשו מזון סביב השונית, כגון כחל מצוי. אפילו אצלן אין צבעוניות מודגשת כל כך כמו אצל דגי השונית עצמה. גם על דגים החיים בים הפתוח אין צבעוניות מגוונת כל כך, פרט כמובן לדגים החיים באזורים סלעיים.

נראה לי כי לא מן הנמנע שהפסים הרוחביים על גופי הדגים קשורים בכושר התמרון של הדג ימינה ושמאלה, ופסי אורך צבעוניים מרמזים על כושר תמרון אחורה וקדימה. רעיון זה עלה בי למראה שיקופית של הדג המוצא את מזונו מבין קוצי קיפוד הים. ( יתכן שהיה זה כילון חמש-פסי. )

לדגים רבים, וגם אצל ציפורים וחרקים שונים, יש כתמים או פסים באזורי העיניים. ניתן להסביר צבעים אלה, אולי, כהגנה על אזורים רגישים במיוחד באמצעות חמרים תת-עוריים המשפיעים על הצבעוניות המיוחדת של האזור. ידוע שבטכנולוגיות מתקדמות של גלאים דורשים הגנות מיוחדות עליהם, כגון טמפרטורה נמוכה, כדי שהם יתפקדו. לא מן הנמנע כי גם לטבע ידועים הצרכים המיוחדים הללו על הגלאים השונים, קרי איזורי החושים השונים. בנוסף לכך, מצאתי הסבר מעניין מאד לגבי תפקודם של כתמים שונים באזורי העיניים.

באשר לנקודות הצבעוניות על גופי דגים מסוימים העליתי השערה ראשונית לעיל כי הדבר קשור אולי עם בקרה על מידת המתיחות של החלק ( כגון כנף פרפר ). אין להוציא מכלל אפשרות שגם לעור הדג נחוצה בקרת מתיחות העור במעברו ממים רדודים למים עמוקים יותר, ולהיפך. אם העור אינו מתוח כדורש גדלה מידת החיכוך בתנועה של העור עם המים והדג עשוי לאבד את כושרו למהירות ותמרון הדרושים. גם אצל יונקים מסוימים, כגון נמר מנוקד למשל, יש נקודות המצביעות אולי על כושר העור להתמתח במצבי רדיפה מסוימים אחר הטרף.

אחד מתלמידי ( אסף ) שאל אותי מה לגבי האבנון. דג זה נח על הקרקעית באזור סלעי ונראה אף הוא כסלע חי עם בליטות היוצאות מגופו. ( ראו למשל בתמונה 160 במדריך של פישלזון [32] ). זאת למשל אחת הדוגמאות המאלפות המובאות כדי להראות את כושר ההסוואה של בעלי החיים. אך זוהי גם דוגמא מאלפת לכושר ההתאמה של הגוף לתנאים ההידרודינמיים בסביבתו. אין ספק כי באזור הסלעי הזה, שבו לסלעים בליטות מרובות, אין זרימות משמעותיות של מים. אחרת הבליטות היו נעלמות והיינו מקבלים גופים חלקים יותר כמו למשל חלוקי הנחל. האבנון נח זמנים ארוכים על הקרקעית באזור ללא זרמים ומחכה שהמזון יגיע אליו, אם זה מזון שנופל לקרקעית משיריהם של הדגים השוחים למעלה או שהמזון הוא דגיגים ויצורי ים המזדמנים לסביבתו של האבנון. מכל מקום הוא לא נע בד"כ ואף המים לא נעים ביחס אליו. אין פלא איפוא כי התפתחותו אינה הידרודינמית אלא אולי אפילו שרירותית ומכאן הבליטות המשונות המקנות לו צורת סלע. אין להתפלא גם על התפתחות אצות על גופו מאותן סיבות שהן מתפתחות על סלעים. לכן אין לראות לדעתי בהסוואה את הגורם לצורת האבנון אלא במיעוט תנועתו לקראת סל מזונותיו. אין ספק כי צורתו המיוחדת של האבנון עוזרת לו גם בהסוואה. לא הייתי מוציא מכלל אפשרות שהאבנון מספיק חכם להשתמש בתכונותיו כדי להסתוות.

מוכרת התופעה של שינוי צבעים בדג והתאמתם לסביבה. על פי "הגישה החברתית" השינוי בא כדי שהדג יהיה מוסווה, על רקע הסביבה, לשם הגנה בפני תוקפיו. על פי "הגישה הפיסיקלית" שלנו כאן עלינו לחפש סיבות יותר עמוקות הקשורות בסל המזונות של הדג ובדרכי השגתם. גם אצל הזיקית מוכרת תופעת החלפת הצבע (ראו ערך "זקיות" ב-3). אך אצל הזיקית כבר עמדו על כך כי מדובר בתגובות לגירויים שונים כגון אור, טמפרטורה ומצבי רוח, ביחוד חרון ורוגז. את מצבי רוח הייתי מסווג כשייכות "לגישה החברתית". לא הייתי מוציא מכלל אפשרות כי מצבי רוח אלו משפיעים על הטמפרטורה בגוף הזיקית ועקב כך מתחוללים השינויים בצבע, כלומר יש לשינויי הצבע בזיקית סיבות פיסיקליות.

גם אצל הזיקית, כמו אצל הדגים, מתבצעים שינויי הצבע ע"י שינוי הריכוזים של הפיגמנטים הצבעוניים בתאי העור (ראו ערך "דגים" ב-3] עמ' 910). "בגישה הפיסיקלית" הייתי מצפה כי גם בדגים הסיבות הראשוניות לשינויי צבע יהיו שינויים סביבתיים פיסיקליים, כגון שינויי טמפרטורה ולחצים בהתאם לסביבות המיוחדות וזרימת המים בכל אזור. מאחר וטמפרטורת ולחצים מוגדרים משפיעים גם על התכסית הסביבתית בכל אזור, עשוי להתקבל מצב שהשינויים בדג תואמים את התכסית הסביבתית ומכאן ההתייחסות אל הדג כמי שמסווה את עצמו לצורך הגנה. אין להוציא מכלל אפשרות מקרים מיוחדים בהם הדג למד לשלוט על ריכוזי הצבעים בעורו והוא נעזר בכך לצרכים משניים כגון הסוואה במהלך הציפיה למזון שיחלוף לידו מבלי שיבחין בדג. כדאי להעיר גם שכאשר מדברים על הסוואה יש לשאול מיהו הצופה ומה הוא רואה. לא כל מה שנראה בעינינו האנושיות כמוסווה אכן מוסווה גם בעיניים של בעלי חיים. נושא זה דומה לשימוש במצלמת אינפרא אדום ממטוס כדי להבחין ברכבים קרביים המצויים מתחת לרשתות הסוואה.

#### ג.6) יונקים בים

ראיתי בערוץ 8 בכבלים (22.00 20.8.98) סרטון על דולפינים, שהם כידוע יונקים שהורגלו לחיים מלאים במים. אדווה כאן על מסקנותי על פי סרטון זה. מזונם העיקרי והיחודי: דגים ובעלי חיים המתחבאים בתוך קרקעית הים, לעיתים גם מדגים שוחים. שיטת לכידת המזון: באמצעות הפה המוארך המשתרע לתוך הקרקע הימית ושולה משם את המזון. שיטת גילוי המזון: שיגור אלומות של גלי קול בתדרים שונים דרך פיהם המוארך. גלי הקול מתפשטים במים פוגעים בעצם ומוחזרים מהעצם אל הדולפין. על ראשו של הדולפין נראית בליטה גדולה, הנראית לי כקולטת את גלי הקול המוחזרים ומעבירה את האותות למח המפרש אותם. צורת הבליטה האליפטית מאפשרת, כנראה לי, לשבור ולרכז את גלי הקול אל עבר מוקד בתוך הראש. זה כמו ריכוז קרני אור ע"י עדשה, אלא שכאן מדובר בגלי קול. שיטת הגילוי הזאת דומה לסונר המשמש בצוללות אך להערכתי הוא הרבה יותר משוכלל ממנו. דברו בסרטון הרבה על החיים החברתיים של הדולפינים ושיייתם בצוותא. הוסבר שם כי הדבר נחוץ כדי להתגונן בפני לוויתנים. הסבר זה תואם את "הגישה החברתית". אך על פי "הגישה הפיסיקלית" יש לחפש הסבר יותר עמוק הקשור בדרכי השגת המזון. ההסבר הפיסיקלי העולה בדעתי הוא שהדולפינים שוחים בצוותא בצורה מסונכרנת ומשדרים קולות מתואמים. בכך מתקבל אפקט הגברה מעולה הדומה לאפקט ההגברה בגלי אור, עליו דנו בפרק ב'. ננסה להעריך את חשיבות העניין. נניח, לצורך הדוגמא, כי דולפין בודד משדר גל קול היכול לאתר מזון מתאים המסתתר בקרקע ברצועה של 10 מ' במרחק 10 מטר ממנו. הדולפין צריך לנוע מהר כדי להספיק לסרוק שטחים גדולים בטרם ימצא את שללו. אך ניתן לשכלל את הסריקה ע"י שילוב משדרים: למשל, שורה של חמישה דולפינים כאלה הנעים במקביל יכולים ליצור אלומת גלי קול צרה וחזקה מאד היכולה לסרוק את האדמה קדימה ברצועה צרה באורך שעשויה, להערכתי, לעלות על 100 מטר. זה דומה במקצת לסריקת הקרקע ע"י לווין הצילום הצרפתי "ספוט". אם הדולפינים יוצרים מספר שורות כאלו, אחת מעל השניה, הם יכולים לעשות סריקות מרחביות לעומקים שונים של הקרקע. זה כבר שידור וקליטה ברשת שלמה. על שיטת הרשת דנו בפרק ב'. אכן, בסרט נראים הדולפינים נעים בסנכרון בצורה שכבתית. גופו של הדולפין חייב להיות חלק כדי שהשחיה עצמה לא תיצור גלי קול העלולים להפריע לאות המשודר והנקלט. תנועותיו הקשתיות עוזרות להקטין את המערבולות בסביבתו לשם אותה מטרה. גופו בעל צבע אחיד, בד"כ אפור. התכונות הפיסיקליות של הצבע האפור, על פי טבלה 2, הן חוזק למתיחה, עמידות בלחץ, בידוד חם ובידוד קור. אין ספק כי תכונות אלו חשובות בגוף נפוח המותח את העור מבפנים והנתון בלחצים גדולים מבחוץ. יש סוגים יוצאי דופן, עם כתמים לבנים, החיים בקטבים. כתמים לבנים אלה מוסיפים עמידות בלחץ ובידוד קור. יש גם סוג של דולפין נקוד כאשר מידת הניקוד מצביעה על גיל. ככל שמתבגרים מתרבות הנקודות. כזכור, קישרתי נקודות לשינויי מתח העור בשעה שמשנים לחצים עליו, למשל בירידה לעומק רב. הזנב והסנפירים כהים מהגוף, נראים כשחורים במינים רבים. כזכור, את הצבע השחור קישרתי בטבלה 2 לחוזק למתיחה. אנו רואים, אם כן, שגם בדולפינים נקודת המוצא של סל המזונות מובילה אותנו להבנת המבנה והצבעים של בעל החיים.

גם בלוויתנים שולט הצבע האפור של העור, מאותן סיבות שאצל הדולפינים. באזורים הארקטיים מצוי הלוויתן הכחול הענק (ראו ערך לוויתנים ב-3]). הגב בצבע אפור-פלדה והגחון בהיר יותר. צבע הגב מתקבל, להערכתי, ע"י תוספת צבע תכול לאפור. לפי טבלה

2, לצבע התכול יש תכונת התכווצות בקור. תכונה כזאת מאפשרת לשהות גם באזורים קרים מאד וגם באזורים פחות קרים. חלק מהבידוד בפני קור מוענק ללוויתן ע"י השומן הרב מתחת לעורו. שומן זה היה גם אחת הסיבות לצייד לווייתנים. אם הלוויתן עובר מאזור בעל טמפרטורה אחת לאזור בעל טמפרטורה נמוכה יותר, השומן מתכווץ. מבחינת מהירות השחיה של הלוויתן, חשוב מאד שהעור לא יהיה רפוי עקב התכווצות השומן. תוספת הצבע התכול לעורו מרמזת על הפיתרון שמצא הטבע. לא מן הנמנע כי גם הכריש הכחול פותר את בעיית המעבר בין אזורים בעלי טמפרטורות שונות, בעומקים השונים של האוקיינוס האטלנטי, באותו אופן.

7.ג) סיכום לפרק בעלי החיים

לסיכום פרק זה, אנו נוכחים שבכל בעלי החיים שראינו, סל המזונות שלו מכתוב את המכשולים עליהם עליו להתגבר. המבנים המיוחדים שלו וחומרי הבנין השונים נחוצים כדי שהוא יוכל להתגבר ביעילות על המכשולים הספציפיים. לחומרים שונים ולמבנים שונים יש צבעים שונים. מכאן ניתן לנסות להעריך את סודם הפיסיקלי של הצבעים בבעלי חיים .

7.ג) דף עבודה לחקירת צבעי בעלי חיים

לפניכם דף עבודה לבדיקת הקשרים בין הצבעים בבעל חיים, אותו תבחרו, לבין סל המזונות שלו והתכונות הפיסיקליות של כל חלק ותת-חלק. נסו לענות על השאלות בהתאם למוסבר בחוברת, באנציקלופדיות, במדריכים שונים ובאינטרנט. כמו כן רצוי להעזר בתצפיות בטבע, בגני חיות ובחנניות לבעלי חיים. עשויות לעזור גם צפיות בסרטי הטבע בטלוויזיה ובוידאו. בתצפיותכם בטבע השתדלו לעקוב אחרי התנהגותו של בעל החיים במצבים שונים מבלי להפריע לו, אחרת התצפיות עלולות לתת תוצאות לא מדויקות בנוסף לפגיעה באיזון הטבעי. בקביעת הצבעים תוכלו להעזר בטבלת הצבעים בסוף החוברת. כמו כן תוכלו להעזר בטבלה 2 הנותנת את המפתח (שלי) לקשר בין הצבעים והתכונות הפיסיקליות.

שם בעל החיים שבחרתם..... :  
 שיין למשפחה .....סוג.....  
 מין (זכר, נקבה) .. גיל (צעיר, בוגר) .....עונה.....  
 תאורו החיצוני.....

מהם הפריטים העיקריים בסל המזונות של בעל החיים:

- א) (.....ב.....) (.....ג.....) (.....ד.....) (.....ה.....)
- ה) (.....ו.....) (.....ז.....) (.....ח.....) (.....ט.....)

מהם המכשולים העומדים בפני בעל החיים להשגת כל פריט במזונותיו:

- א) (.....ב.....) (.....ג.....) (.....ד.....) (.....ה.....)
- ה) (.....ו.....) (.....ז.....) (.....ח.....) (.....ט.....)

מהן השיטות העיקריות בהתגברות על המכשולים:

- א) (.....ב.....) (.....ג.....) (.....ד.....) (.....ה.....)
- ה) (.....ו.....) (.....ז.....) (.....ח.....) (.....ט.....)

באיזה חלק ותת-חלק בבעל החיים הוא נעזר להשגת מזונותיו:

- חלק א) (.....) תת-חלק.....
- חלק ב) (.....) תת-חלק.....
- חלק ג) (.....) תת-חלק.....

- ..... חלק ד) (תת-חלק
- ..... חלק ה) (תת-חלק
- ..... חלק ו) (תת-חלק
- ..... חלק ז) (תת-חלק
- ..... חלק ח) (תת-חלק
- ..... חלק ט) (תת-חלק
- ..... חלק י) (תת-חלק

מה עשויות להיות התכונות הפיסיקליות הנדרשות מכל חלק ותת-חלק שזיהיתם:

- ..... חלק א) (תת-חלק
- ..... חלק ב) (תת-חלק
- ..... חלק ג) (תת-חלק
- ..... חלק ד) (תת-חלק
- ..... חלק ה) (תת-חלק
- ..... חלק ו) (תת-חלק
- ..... חלק ז) (תת-חלק
- ..... חלק ח) (תת-חלק
- ..... חלק ט) (תת-חלק
- ..... חלק י) (תת-חלק

נסו לזהות, על פי שיטת תשע האזורים שבפרק א, מהם הצבעים של כל חלק ותת-חלק:

- ..... חלק א) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק ב) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק ג) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק ד) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק ה) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק ו) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק ז) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק ח) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק ט) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו
- ..... חלק י) (צבעו ..... תת-חלק ..... צבעו

באילו חלקים ותת-חלקים של בעל החיים מתקיימת ההתאמה שעשיתי בטבלה 2 בין התכונות הפיסיקליות לבין הצבעים:

- ..... חלק א) (תת-חלק
- ..... חלק ב) (תת-חלק
- ..... חלק ג) (תת-חלק
- ..... חלק ד) (תת-חלק
- ..... חלק ה) (תת-חלק
- ..... חלק ו) (תת-חלק
- ..... חלק ז) (תת-חלק
- ..... חלק ח) (תת-חלק
- ..... חלק ט) (תת-חלק
- ..... חלק י) (תת-חלק

אם אין התאמה, מה לדעתכם עשויות להיות הסיבות הפיסיקליות.

- ( א) (ב.....(ג.....(ד.....(
- ( ה) (ו.....(ז.....(ח.....(

האם יש הבדלים בצבעים לגבי חלקים מקבילים בבעלי חיים אחרים שבדקתם. אם כן, מה עשויות להיות לדעתכם הסיבות הפיסיקליות להבדלים אלו:



.....  
לאחר שבדקתם עשרות דוגמאות של בעלי חיים, מה לדעתכם רצוי לתקן או להוסיף במפתח התכונות הפיסיקליות של הצבעים (שלי) הניתן בטבלה 2:.....

.....  
הערות נוספות:.....

.....  
.....  
.....  
( ד ) סיכום

לאור שפע ההסברים הפיסיקליים והדוגמאות מהפרחים ומבעלי החיים על הקשרים שבין צבעים ותכונות פיסיקליות, קשה להתעלם מהאפשרות שיש ממש בגישה הפיסיקלית החדשה. על פי גישה זאת, כל הצורות והצבעים בפרט כלשהוא, בחי ובצומח, הם תוצאה עקיפה של סל המזונות המיוחד של אותו פרט. סל המזונות עשוי לכלול גם קרינות שונות, כגון קרני אור צבעוניות, אך לא רק בתחום הנראה של הספקטרום. הצורך להתגבר על המכשולים השונים העומדים בפני בעל החיים, או הצמח, להשיג את סל מזונותיו המסוים גרם במשך האבולוציה להתפתחות של חלקים שונים בכל פרט, בעלי תפקודים פיסיקליים מוגדרים. חלקים אלה בנויים מחומרים וצורות כאלו המעניקים לחלק את צבעיו. לכן, על פי הגישה הפיסיקלית, המטרה הראשונית של הצורה והצבע בחי ובצומח היא השגת סל מזונותיו. משלל הדוגמאות וההסברים שבחוברת מתקבל הרושם כי המפתח שמצאתי לתכונות הפיסיקליות של הצבעים, כפי שניתן בטבלה 2, הוא כנראה בכיוון הנכון. ידרשו עוד מחקרים רבים כדי לדייק יותר הן בהגדרת התכונות והן במידות המוענקות לכל תכונה בכל צבע בטבע. לא מן הנמנע, ואפילו סביר לצפות, כי בעלי החיים והצמחים יעשו שימושים משניים בצורות ובצבעים המיוחדים של חלקי גופם. בין השימושים המשניים הללו ניתן למנות התגוננות, הסוואה, אזהרה, חיזור, עזרה בהפריה, פרסומת וכו'. אני מכנה בחוברת תכונות משניות אלו בשם הכולל "הגישה החברתית". היתרון הגדול של הגישה הפיסיקלית שהיא מאפשרת בפוטנציה מציאת הסברים לכל צורה וצבע בחי ובצומח אשר קל יחסית לבדוק אותם. לשם כך דרושים רק תקציבים, זמן ועקביות. לעומת זאת, הגישה החברתית אינה מספקת הסברים לצורות ולצבעים רבים בחי ובצומח. מה עוד שלעולם לא ניתן לאשר סופית את ההסבר בגישה החברתית ותמיד ניתן לשאול שאלות לגבי הדרך שבה יודע בעל החיים או הצמח כיצד הוא נראה בעיני אחרים. הדוגמא הקלסית היא פרח דבורנית הדבורה. קשה להעלות על הדעת מכניזם כלשהו, אפילו במהלך מיליוני שנים, שבו הפרח הזה "ראה" את הדבורה והתאים את עצמו לצורתה וצבעיה כדי להונות את הזכר לבוא דווקא אליו. לעומת זאת, באמצעות הגישה הפיסיקלית, ניתן בעקרון למצוא תכונות פיסיקליות דומות הן אצל הדבורה והן אצל הפרח דבורנית הדבורה, ובכך להסביר את הסיבה לדמיון ביניהם. השארת משימה זאת כחידת אתגר לקוראים, עם רמז - להעזר בטבלה 2. היתרונות בהסברים הפיסיקליים הם לא רק לצורך הקוריוז, אם כי עלי להודות שגם בכך מצאתי הנאה מרובה. הפוטנציאל הגלום בגישה הפיסיקלית מאפשר לחקור ולהבין את החי והצומח במידה מעמיקה יותר לטובת החקלאות, התעשייה, הרפואה ואפילו לתיירות בטבע. לא פחות חשוב מכך היא ההנאה הגדולה של חובבי הטבע בראותם את העושר העצום של פתרונות מדהימים בחי ובצומח שהטבע מצא כדי להתגבר על המכשולים השונים.

אני שב ומודה לחברה להגנת הטבע על עזרתה בפרסום חוברת זאת, ובכך איפשרה לפרוץ דרך לגישה הפיסיקלית החדשה. אשמח לקבל, דרך החברה להגנת הטבע, שאלות והערות מכל אחד על כל הצעה להסבר פיסיקלי שלי. יש לקוות שבאמצעות הערותיכם ושאלותיכם ימצאו הסברים מעניינים נוספים. בחוברת הבאנו דפי העבודה בפרחים ובבעלי חיים. דפי עבודה נוספים, עם פרטים בסיסיים על סל המזונות ותנאי המחיה של בעלי חיים וצמחים מסוימים, ניתן יהיה להשיג בחנויות החברה להגנת הטבע. בכך יתאפשר לכל אחד ואחד ליטול חלק בחשיפת סודותיהם של הצורות והצבעים בבעלי חיים ובצמחים.

(1) ביבליוגרפיה

- [1] פיסיקה תיכונית, פ. סירס ומ. זימנסקי, הוצאת יבנה, הספרים: מכניקה, תורת האור, תורת החם הגלים והקול, חשמל ומגנטיות א' ו-ב'.
- [2] הציפורים - מגדיר שדה שלם לציפורי אירופה והמזרח התיכון, ה. היינצל ואחרים, הוצאת הקיבוץ המאוחד (1975).
- [3] האנציקלופדיה העברית.
- [4] The Nidification of Birds of the Indian Empire, E.C.S. Baker, Vol. IV, London, (1935)
- [5] מדריך פרחי הבר בישראל, כרך א' הצמחיה הים-תיכונית, א. שמידע וד. דרום, הוצאת כתר (1991).
- [6] מדריך פרחי הבר בישראל, כרך ב' צמחיית המדבר, א. שמידע וד. דרום, הוצאת כתר (1991).
- [7] Antenna Engineering Handbook, H. Jasik, McGraw-Hill, 1961.
- [8] צמחי ישראל בתמונות, ע. פליטמן, ק. חן, א. דנין, א. שמידע, וד. דרום, הוצאת מסדה (1983).
- [9] Optical Radiation Measurements, Vol. I, F. Grum & R.J. Becherer, Academic Press, 1979.
- [10] CRC Handbook of Chemistry and Physics, Rubber Co., 53<sup>rd</sup> edition 1972-1973
- [11] על פרחים וצמחים בארץ ישראל, י. איזנשטיין, הוצאת משרד הבטחון (1981).
- [12] פרפרי ארץ ישראל, י. איזנשטיין, הוצאת עם עובד (1983).
- [13] מדריך החרקים בישראל, פ. אמיתי, הוצאת כתר (1991).
- [14] אנטנות - מדריך פילקו, תרגום ד. בירן ומ. שניר, הוצאת אורט (1971).
- [15] דגי מפרץ-אילת, מ. שפיגל, הוצאת החברה להגנת הטבע (1993).
- [16] מדריך הים וחופיו - חי וצומח, ד. דרום ומ..... הוצאת כתר (1992).
- [17] איריסים, ע. אלון, הוצאת משרד הבטחון והחברה להגנת הטבע (1992).
- [18] (אנציקלופדיה) החי והצומח של ארץ ישראל, עורך ע. אלון, הוצאת משרד הבטחון והחברה להגנת הטבע.
- [19] מדריך הפרפרים בישראל, ד. בנימיני, הוצאת כתר (1990).
- [20] לקסיקון החי והצומח של ארץ ישראל, עורך ע. אלון, הוצאת משרד הבטחון והחברה להגנת הטבע (1995).
- [21] aves - Berkeley Physics Course, Vol3, F.S. Crawford, McGraw-Hill (1968).

- [22] The Infrared Handbook, W.L. Wolf & G.J. Zissis, ed, IRIA Center (1978).
- [23] O. Totland, "Flower heliotropism in an alpine population of *Ranunculus acris* (Ranunculaceae) effects on flower, temperature, insect visitation and seed production, American Journal of Botany 83(4), 452-458 1996
- [24] J.R. Cooley, "Floral heat rewards and direct benefit to insect pollinators in America", 576-579, 1995.
- [25] C.M. Herrera, "Floral biology, microclimate and pollination by ectothermic bees in an early-blooming herb", Ecology 76(1), 218-228, 1995.
- [26] M.L. Stanton & C. Glan, "Blue light controls solar tracking by flowers of an alpine plant", Plant Cell and Environment, 16, 983-989, 1993.
- [27] Influence of petals on reproductive success in the arctic poppy (*Papaver radicum*), Canadian Journal of Botany, 70(1), 200-204, 1992
- [28] י. פריד, "הפיסיקה של ה"עין" בזנב הטווס, (מאמר בהכנה לפרסום) .
- [29] אל הציפורים, ח. זיו, הוצאת ידיעות אחרונות וספרי חמד (1996) .
- [30] Avian Anatomy Integument, Part II, A.M. Lucas and P.R. Settenheim, Printing Office, Washington
- [31] ארץ פרא, י. אשכול, הוצאת משרד הבטחון (1995) .
- [32] מגדיר דגי שוניות אילת", ל. פישלזון, הקיבוץ המאוחד (1981) .
- [33] מדריך היונקים בישראל, ב. שלמון, הוצאת כתר (1993) .
- [34] לקסיקון לצמחי בית ולקטוסים, א. שטיינמן, הוצאת עם עובד (1987) .
- [35] טווסים אלטרואיזם ועקרון ההכבדה, אמוץ ואבישג זהבי, הוצאת החברה להגנת הטבע (1996) .
- A. Zahvi, "The theory of signal selection and some of its implications", Proc. Inter. Symp. V.P. Delinio, ed., Adriatica Editrica Bari 1987 ,
- [36] מדריך הדגים של ישראל, ד. גולני וד. דרום, הוצאת כתר (1997) .
- [37] פיסיולוגיה של הצמח, א. פוליקוב-מיבר ואחרים, הוצאת עם עובד ודביר (1968) .
- [38] פרח בר, ד. דרום, הוצאת כתר (1996) .
- [39] מדריך פרפרים בצבעי הקשת, י. אייזנשטיין, הוצאת ידיעות אחרונות וספרי חמד (1997) .
- [40] דרך ארץ - אדם וטבע, ע. זהרוני, עורכת, הוצאת משרד הבטחון (1985) .

300 [41] פרחי בר בצבעי הקשת, ע. אלון,  
הוצאת ידיעות אחרונות וספרי חמד (1997 ?)

[42] מדריך ישראל - אנציקלופדיה שימושית לידיעת הארץ, עורך א. יצחקי,  
הוצאת כתר ומשרד הבטחון (1978 ?)

[43] פרחי בר מנגב עד חרמון, ע. פז, הוצאת מסדה (1970) .

[44] A Dictionary of Color, A. Maerz and M.R. Paul, McGraw Hil.